

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANA CRISTINA MELIM BENTHIEN DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS RESISTÊNCIAS DOS
CONCRETOS DESTINADOS À PRODUÇÃO DE BLOCOS
ESTRUTURAIS**

**Florianópolis - SC
Junho de 2009**

ANA CRISTINA MELIM BENTHIEN DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS RESISTÊNCIAS DOS
CONCRETOS DESTINADOS À PRODUÇÃO DE BLOCOS
ESTRUTURAIS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador:

Luiz Roberto Prudêncio Jr.

**Florianópolis – SC
Junho de 2009**

ANA CRISTINA MELIM BENTHIEN DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS RESISTÊNCIAS DOS
CONCRETOS DESTINADOS À PRODUÇÃO DE BLOCOS
ESTRUTURAIS**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, ____ de Junho de 2009.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do PPGEC

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior
Moderador - ECV/UFSC

Prof^a. Dr^a. Gladis Camarini
UNICAMP

Prof. Dr. Roberto Caldas de A. Pinto
ECV/UFSC

Prof^a. Dr^a. Janaíde Cavalcante
ECV/UFSC

*Ao meu marido Claudio,
e aos meus queridos filhos
pelo apoio incondicional*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, colegas e servidores da UFSC.

Em especial, ao Professor Luiz Prudêncio, orientador desta tese, que a idealizou e dela participou diretamente, demonstrando sua alta capacidade técnica como professor e pesquisador. Agradeço a sua paciência e compreensão durante estes anos de desenvolvimento deste trabalho, contribuindo com seus valiosos conhecimentos e sempre disposto a recomendar.

Com carinho e gratidão, agradeço ao meu marido e filhos pelo apoio constante, paciência e compreensão durante estes anos de viagens e estudos. Agradeço pelas horas de espera e ajuda no laboratório e principalmente a compreensão pelas horas de ausência.

Aos meus pais, pelo incentivo aos estudos e pelo esforço realizado para minha formação em Engenharia Civil. Em especial à minha mãe, pelo exemplo de coragem, persistência e motivação pelos estudos e pela profissão. Registro aqui minha admiração.

À Toniolo Pré-Moldados, que, fornecendo materiais e a instalação da fábrica proporcionou o suporte indispensável para esta pesquisa.

Em especial à Olmira, companheira de viagem e de horas de laboratório, sempre disposta a ajudar, independente da dificuldade.

Ao André, colega de laboratório e amigo, agradeço as longas horas de laboratório e toda sua indispensável dedicação, sem a qual não seria possível concluir esta dissertação.

Agradeço aos meus tios, Célio e Ione, pelas inúmeras hospedagens, às minhas companheiras de viagem, em especial à Maura, grande incentivadora.

De forma carinhosa e especial, agradeço também à minha irmã Ana Karina pelo incentivo e apoio e aos meus avós, Sélvio (in Memoriam) e Iolanda que sempre me incentivaram nos meus projetos e acreditaram no meu potencial.

RESUMO

A cura do concreto em vapor à pressão atmosférica, em temperaturas variando entre 60°C a 100°C é o método mais utilizado para acelerar o endurecimento do concreto, sem comprometer sua qualidade. O objetivo principal deste trabalho é estudar a interferência da cura térmica aplicada a blocos de concreto pré-moldados, observando a influência do tempo de espera e da temperatura aplicada, no desenvolvimento da resistência. Simulou-se em laboratório uma câmara com condições de umidade e temperatura semelhantes aos de uma fábrica de blocos, utilizando-se neste estudo corpos-de-prova cilíndricos 5x10cm moldados com concreto “secos”. Foram estudadas combinações de três traços: 1:7, 1:9 e 1:11, temperaturas de 40°C, 60 C e 80°C e tempo de espera de 1, 2 e 3 horas. Os CP's foram rompidos com 8 horas e também aos 7, 28 e 90 dias. Concluiu-se neste estudo que a cura térmica em todos os ciclos estudados contribuiu para acelerar a resistência das peças. O melhor resultado encontrado, considerando maior resistência nas primeiras 8 horas, menores perdas aos 28 e 90 dias e menor consumo de energia foi obtido com a temperatura de 60°C e tempo de espera de 2 horas.

Palavra-Chave: Bloco de concreto, Cura térmica.

ABSTRACT

The atmospheric-pressure steam curing, at temperatures hanging from 60°C to 100°C is the most used method to accelerate the hardening of concrete blocks to allow an early handling and pallet placement. However, there is not a good knowledge about the influence of such curing method on initial and later age block strength and it probably depends on the type of cement used. This paper aims at studying the interference of such curing process on the strength development of concrete used in block production when high initial-strength sulfate resistant cement is used. The study was based on a production cycle time of 8 hours, including preset, heating and cooling times, commonly adopted in concrete block plants by allowing 3 cycles a day. It was employed a small curing chamber specially built for this work and 5x10 cylindrical specimens of dry concrete were adopted to evaluate the compressive strength of concrete. Mix proportions of 1:7, 1:9 and 1:11 (cement-aggregates), maximum curing temperatures of 40°C, 60°C and 80°C and preset time of 1, 2 and 3 hours combinations were studied. The specimen's compressive strength was evaluated at 8 hours, 7, 28 and 90 days. It was found that all curing cycle studied accelerated the initial compressive strength but the best general combination of parameters, considering initial and later age strength and energy consume, was 2 hours of preset time and maximum temperature of 60°C.

Keywords: Concrete block; steam curing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estoque de blocos em fábrica de blocos de concreto.	22
Figura 2 - Representação gráfica da Lei de Abrams	30
Figura 3 – Layout de uma fábrica de blocos e/ou PCP (FRASSON, 2000).....	32
Figura 4 – Máquina vibro-prensa utilizada na produção de blocos de concreto.	36
Figura 5 - Fábrica de blocos de concreto. Detalhe dos silos de cimento e agregados.	36
Figura 6 – Detalhe do transporte mecânico das chapas com os blocos recém moldados.....	37
Figura 7 – Grades com as chapas metálicas, carregadas com os blocos deslocados para as câmaras de cura. Pode-se observar também conjunto de blocos já paletizados.	38
Figura 8 - Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum (JAWED, SKALNY & YOUNG, 1983)	48
Figura 9 - Quantidades e significado dos tipos de vazios presentes na pasta de cimento Portland (DE MELO, 2000).	57
Figura 10 - Tipos de águas presentes na pasta de cimento Portland (DE MELO, 2000).	58
Figura 11 - Ciclo de Cura Térmica	62
Figura 12 - Câmaras de cura utilizadas em uma fábrica de blocos.	70
Figura 13 – Distribuição dos blocos dentro das câmaras de cura.	71
Figura 14 - Gráfico da curva granulométrica dos agregados utilizados	85
Figura 15 - Molde tripartido 5x13 utilizado para moldar os corpos-de-prova cilíndricos 5x10	87
Figura 16 - Fluxograma sequência dos ensaios	88
Figura 17 - Ciclos térmicos com 1 hora de espera.....	91
Figura 18 - Ciclos térmicos com 2 horas de espera	91
Figura 19 - Ciclo térmico com 3 horas de espera	92
Figura 20 - Fluxograma sequência de cura dos corpos-de-prova	92
Figura 21 - Sistema para cura térmica a vapor	94
Figura 22 - Sistema de resfriamento	95
Figura 23 - Tempo de cura até ensaio de Resistência.....	96
Figura 24 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:7.....	98
Figura 25 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:9.....	98
Figura 26 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:11.....	99
Figura 27 – Resultado dos ensaios após a cura térmica – 8 horas.	100

Figura 28 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas com vapor x peças de REF, em pontos percentuais, para temperatura de cura de 40°C.....	101
Figura 29 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas..	101
Figura 30 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas..	102
Figura 31 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:7 com 1 e 2 horas de espera.	102
Figura 32 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:9 com 1, 2 e 3 horas de espera.	103
Figura 33 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:11 com 1 e 2 horas de espera.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre dimensão das partículas de cimento Portland e Tempo de hidratação, sob condições normais de cura (TAYLOR, 1992).	41
Tabela 2 - Características recomendadas para agregados graúdos empregados na produção de peças pré-moldadas de concreto (NBR 7211 - ABNT, 2006).	43
Tabela 3 - Características recomendadas para agregados miúdos empregados na produção de peças pré-moldadas de concreto (NBR 7211 - ABNT, 2006)	44
Tabela 4 - Efeito predominante do aditivo incorporador de ar na pasta de cimento	45
Tabela 5 - Significado físico das reações básicas de hidratação do cimento Portland (JAWED, SKALNY E YOUNG,1983)	52
Tabela 6 - Variação da taxa de hidratação (%) das fases presentes no cimento Portland com a idade (ASAGA et al., 1992)	72
Tabela 7 - Composição granulométrica da areia fina.....	83
Tabela 8 - Composição granulométrica da areia média	84
Tabela 9 - Composição granulométrica do pedrisco.....	84
Tabela 10 - Massa Específica e Material Pulverulento dos agregados utilizados na moldagem dos CPs 5 x 10.....	85
Tabela 11 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa.	86
Tabela 12 - Proporcionamento dos materiais.....	89
Tabela 13 - Número de CPs para cada ciclo de cura.....	90
Tabela 14 - Número de CPs para ciclo de cura – espera de 3 horas	90
Tabela 15 - Resultados: Corpos de prova submetidos à cura térmica com tempo de espera de 1 ou 2 horas.....	97
Tabela 16 – Comparativo: Valores Obtidos/Valores de Referência para cada idade, traço e temperatura de cura térmica, em percentual.	100
Tabela 17 - Resultados: Razão entre resultados com tempo de espera de 2h/1h para rompimentos após 7h ou 8h.....	105
Tabela 18 - Resultados : Corpos de prova submetidos a cura térmica com tempo de espera de 2 e 3 horas. Razão entre resultados com tempo de espera de 3h/2h.	105

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Histórico das peças pré-moldadas.....	19
1.2 Blocos de Concreto para Alvenaria estrutural e vedação.....	19
1.3 Produção de Blocos de Concreto.....	21
1.4 Cura térmica - Estudos realizados no Brasil.....	24
1.5 Objetivos do trabalho.....	26
1.6 Conteúdo e divisão do trabalho	26
 2. CONCRETO UTILIZADO EM BLOCOS.....	 29
2.1 Aspectos tecnológicos dos concretos utilizados em blocos.....	29
2.2 Processo produtivo de Blocos	32
2.3 Etapas para produção de blocos:	33
2.3.1 Proporcionamento dos materiais.....	33
2.3.2 Mistura	34
2.3.3 Moldagem vibro-compressão.....	35
2.3.4 Transporte, Cura e Armazenamento	37
 3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	 39
3.1 Definições:	39
3.1.1 Cimento Portland.....	39
3.1.2 Cinza Volante	42
3.1.3 Agregados Graúdos.....	43
3.1.4 Agregados Miúdos	43
3.1.5 Água.....	44
3.1.6 Aditivos.....	44
 4. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	 46
4.1 Estágios da hidratação do cimento Portland.....	47
4.2 Hidratação do cimento x Resistência x Porosidade	53
4.3 Estrutura da pasta endurecida.....	54
4.3.1 Sólidos	55
4.3.2 Vazios	56
4.3.3 Água.....	57
 5. CURA TÉRMICA.....	 59
5.1 Objetivos da cura térmica.....	59

5.2 Efeito da temperatura de cura na hidratação e nas propriedades das pastas de cimento Portland.....	61
5.3 Ciclos de Cura.....	61
5.3.1 Tempo de Espera.....	63
5.3.2 Período de elevação da Temperatura	66
5.3.3 Período Isotérmico	68
5.3.4 Período de Esfriamento.....	68
5.4 Câmara de cura térmica	69

6. EFEITOS DA CURA TÉRMICA NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO..... 72

6.1 Produtos de hidratação do concreto submetido a cura térmica	72
6.2 Formação de etringita secundária.....	75
6.3 Método da Maturidade.....	77
6.4 Considerações Finais:.....	79

7 MATERIAIS E MÉTODOS 81

7.1 Método de dosagem proposto por Frasson (2000)	82
7.1.1 Proporcionamento entre os agregados:	82
7.2 Agregados e aglomerante utilizados na pesquisa	83
7.3 Equipamentos e procedimentos para a confecção dos CPs 5x10	87
7.4 Plano de moldagem e traços empregados na moldagem dos corpos de Prova 5 x 10 cm	88
7.5 Procedimentos de cura.....	93

8 RESULTADOS E ANÁLISE 97

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS..... 108

10 REFERÊNCIAS..... 110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Histórico das peças pré-moldadas

A industrialização da construção civil, através da utilização de peças de concreto pré-fabricadas, promoveu no Brasil e no mundo um salto de qualidade nos canteiros de obras pois, através de componentes industrializados com rigoroso controle de qualidade e rapidez no processo produtivo, as obras tornaram-se mais limpas, organizadas e rápidas. (SERRA et al., 2005)

O sistema pré-fabricado se identifica primeiramente com a história da industrialização que, por sua vez, está relacionada com o período histórico da mecanização, ou seja, com a evolução das ferramentas e máquinas para produção de bens. De forma gradativa, as atividades exercidas pelo homem com auxílio da máquina foram sendo substituídas por mecanismos, como aparelhos mecânicos ou eletrônicos, ou genericamente por automatismos. (SERRA et al., 2005)

Conforme ORDONÉZ (1974) foi no período pós Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, que começou, verdadeiramente, a história da pré-fabricação como “manifestação mais significativa da industrialização na construção”, e a utilização intensiva do pré-fabricado em concreto deu-se em função da necessidade de se construir em grande escala.

1.2 Blocos de Concreto para Alvenaria estrutural e vedação

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo bastante antigo. Data das idades mais remotas onde o homem utilizava blocos espessos de pedra para construir sua habitação (FRASSON, 2000).

Os últimos dois séculos foram marcados por uma grande evolução da humanidade e alto crescimento populacional. A descoberta de novas tecnologias e materiais, a revolução industrial, entre outros fatores, impuseram a adoção de construções mais baratas a fim de atender a necessidade habitacional e industrial.

O advento do concreto armado no início do século XX trouxe a possibilidade de se fazer estruturas esbeltas com grandes vãos, propriedades que a alvenaria não podia concorrer por suas próprias características. Assim, ela ficou relegada a segundo plano, passando a ser utilizada basicamente como elemento de vedação nas construções

(FRASSON, 2000).

A partir dos anos 20 iniciaram-se pesquisas e desenvolvimento na área de materiais e cálculos com utilização de alvenarias com função estrutural.

Segundo o MANUAL TÉCNICO DE ALVENARIA (1990), no Brasil, a alvenaria estrutural com blocos de concreto iniciou-se em fins dos anos 60 com a montagem de grandes fábricas produtoras de blocos de concreto.

A opção pelo emprego de blocos de concreto, em detrimento dos cerâmicos, para a construção de edificações tem sido crescente no Brasil. Este crescimento está sendo observado, não só para o uso em alvenarias estruturais, mas também para alvenarias de vedação.

Nas alvenarias de vedação, este fato tem se justificado não só pelo esgotamento das jazidas de argila para produção de blocos cerâmicos e aprimoramento das leis ambientais que tem inibido o desmatamento de reservas florestais nativas para produção de lenha, que é o principal combustível da indústria cerâmica, mas principalmente, pelas vantagens técnicas advindas da utilização dos blocos de concreto (FRASSON, 2000).

Apesar dos preços dos blocos de concreto serem ainda superiores aos dos cerâmicos, o custo final das alvenarias tem tornado a opção pelos primeiros cada vez mais vantajosa. A precisão dimensional quase que absoluta das peças diminui a espessura das camadas de revestimento além de simplificar e tornar mais rápida a sua aplicação reduzindo assim os custos. Além disso, a possibilidade de conceber os projetos com dimensões coordenadas e múltiplas dos blocos e de incorporação das instalações elétricas e, em alguns casos hidráulica, elimina desperdícios com quebras de paredes e retrabalhos (FRASSON, 2000).

Mas, sem dúvida alguma, o motivador principal deste aumento de produção tem sido o crescimento do sistema construtivo em alvenaria estrutural de blocos de concreto.

A racionalização que impõe o processo à execução da obra evita desperdícios em todas as fases da construção. Comparando-se as vantagens de seu uso em relação aos dos blocos cerâmicos, poderíamos citar:

- Menor massa específica do bloco de concreto, remetendo a cargas menores na edificação;
- Sua precisão dimensional;
- Diversidade de peças que possibilitam uma adequação de passagens

- de instalações elétricas e hidráulicas na obra;
- Possibilidade de dosagem racional para alcance de resistências especificadas em projeto com grande precisão e baixa variabilidade;
 - Compatibilidade bloco-argamassa conduzindo a uma maior eficiência na
 - resistência de paredes em relação às paredes cerâmicas;
 - Disponibilidade de matérias-primas em praticamente todos os locais;
 - Processos de fabricação eficientes dos blocos, com maquinários capazes de produzir em grande escala materiais de alta qualidade (FRASSON, 2000).

1.3 Produção de Blocos de Concreto

No Brasil já existem fábricas que possuem equipamentos de grande porte, muitos deles adquiridos dos melhores fabricantes de maquinários do mundo, com capacidade de produzir peças de qualidade e em grande quantidade. Porém, o que ainda se observa é a falta de um controle sobre o processo produtivo, capaz de conferir segurança, qualidade e economia nos materiais produzidos.

A norma brasileira especifica resistências características de até 16 MPa em área bruta para blocos normalizados. No entanto, poucas são as fábricas que conseguem garantir o alcance de resistências características de 12 MPa nos blocos, resistência esta requerida por projetos de edifícios mais altos recentes na região Sul.

As causas desta dificuldade em atingir resistências maiores estão na falta de conhecimento e procedimentos utilizados na produção dos blocos de concreto. A resistência característica final das unidades produzidas é conseguida mediante o equacionamento de inúmeras variáveis contidas nos processos de produção e também dos processos de cura (FRASSON, 2000).

Nas indústrias de concreto pré-moldado, a técnica de cura para acelerar o desenvolvimento de resistência mecânica, como método padrão para grandes produções, é através da elevação de temperatura do concreto nas idades iniciais.

A idéia da aplicação de processos de cura térmica está em obter maiores resistências mecânicas nas primeiras idades, liberando as chapas mais rapidamente. Também reduz a área destinada à cura e aos estoques nas indústrias de pré-fabricados, possibilitando cumprir reduzidos prazos de entrega e permitindo a utilização das peças em curto

espaço de tempo.



Figura 1 – Estoque de blocos em fábrica de blocos de concreto.

Os investimentos iniciais em chapas de aço na indústria de pré-moldados de blocos de concreto de cimento Portland, em geral, são altos, havendo a necessidade de utilizá-las o mais intensivamente possível entre uma e outra moldagem. A consequência é que a movimentação das peças pode ocorrer em instantes inadequados, comprometendo a durabilidade do produto. Isto contraria o conceito fundamental da pré-moldagem que está relacionado ao rigoroso controle de qualidade do produto. A cura térmica é uma alternativa, pois é utilizada para acelerar a resistência mecânica inicial do concreto. (DE MÉLO, 2000)

Segundo Libório (1990), a movimentação e utilização precoce de um elemento pré-moldado com baixas resistências mecânicas introduz anomalias no mesmo como: quebras, deformações excessivas ou mesmo aparecimento de pequenas fissuras.

A cura do concreto em vapor à pressão atmosférica, em temperaturas variando entre 60°. C e 100°. C é o método mais empregado em escala comercial para acelerar o endurecimento do concreto, obtendo-se resistências mecânicas elevadas em curto prazo.

Esse método, que visa otimizar os equipamentos e as condições operacionais, está baseado na aceleração das reações de hidratação do cimento Portland. Essa aceleração de reações, por sua vez, produz a aceleração do endurecimento da pasta de cimento do concreto (CAMARINI E CINCOTTO, 1996).

Devido a essa aceleração de reações pela temperatura de cura, o grau de hidratação do cimento em temperaturas elevadas não é o mesmo do que a 20°. C. A cura térmica, embora acelere a cinética das reações iniciais, não permite uma hidratação total ao longo do tempo. Assim, o concreto adquire uma grande parcela de resistência no início, mas o crescimento de resistência ao longo do tempo não é tão acentuado quanto na cura normal (CAMARINI E CINCOTTO, 1996).

Condições de cura à temperatura ambiente sem nenhum controle, permitem rápida evaporação da pequena quantidade de água da mistura, trazendo maiores prejuízos no desempenho dos elementos do que aqueles provenientes da cura acelerada, em longa idade. No concreto de alto desempenho, que utiliza baixas relações água/cimento (a/c), o período de cura mais crítico para essa perda de água é entre 12 horas e 36 horas (AITCIN, 1997). Nos pré-moldados, que também utilizam baixas relações a/c, o período de cura crítico deve ser o mesmo, o que coloca a cura térmica a vapor sob pressão atmosférica, como uma alternativa válida para o controle e a garantia de uma cura bem realizada neste período. (MELO, 2000)

Muitos pesquisadores têm investigado os processos de cura acelerada e suas conseqüências em longo prazo, constatando uma perda de resistência potencial ao longo do tempo. Observaram diferenças na microestrutura desenvolvida, tais como: morfologia alterada do C-S-H em volta dos grãos de cimento, estrutura de poros mais graúda, microfissuras, formação de etringita secundária e formação de produtos hidratados com menor desempenho mecânico (CAMARINI & CINCOTTO, 1995; CAMPBELL & DETWILER, 1993; KJELSEN et al, 1990; PATEL et al, 1995; SCRIVENER, 1992; MELO, 2000;...).

Desta forma, torna-se necessário estudar as variáveis envolvidas no processo de cura térmica, visando minimizar as perdas que possam surgir ao longo do tempo e pesquisando outras variáveis que possam influenciar na resistência das peças imediatamente após o ciclo de cura, tais como: tempo de espera, gradiente térmico e temperatura máxima de cura.

Conhecendo melhor a influência destas variáveis, será possível prever e proporcionar, com mais exatidão, as características finais dos blocos de concreto, resultando em economia e segurança na produção

dos mesmos para que as peças atinjam a resistência e qualidade necessárias.

1.4 Cura térmica - Estudos realizados no Brasil

Poucos foram os estudos divulgados no início das pesquisas sobre a cura térmica no Brasil, pois existiam poucas revistas técnicas na área de tecnologia do concreto. A partir de alguns dados disponíveis em nossa literatura e dados levantados por CAMARINI, 1995, apresentamos o seguinte histórico:

1973 - Os primeiros trabalhos divulgados sobre a aceleração da resistência do concreto.

1975 - PFIEL divulga os principais aspectos dos métodos construtivos da ponte Rio - Niterói, em que se utilizou cura térmica com aquecimento elétrico das formas, e cura a vapor da laje superior.

1976 - BAUER E OLIVAN iniciaram um estudo para a previsão da resistência do concreto a partir de ensaios acelerados em água quente, particularmente na água em ebulição.

1976 - Obras de Arte da Rodovia dos Imigrantes: pela primeira vez no Brasil, vigas pré-fabricadas protendidas de grande porte, tiveram a cura e o endurecimento acelerados pelo processo eletrotérmico de fios imersos. Nessas obras utilizou-se o cimento Portland comum, pois o cimento de alta resistência inicial não proporcionou os resultados esperados na cura térmica.

1976 - IBRACON, “Colóquio sobre Pré-moldados de Concreto”, não só se retomou o estudo dos ensaios acelerados para prever resistências (NUGENT, 1976), como também MALHOTRA, (1976) apresentou um levantamento sobre a utilização e o futuro destes ensaios. Na oportunidade, houve a divulgação dos primeiros trabalhos de cura acelerada por agentes térmicos, em que se colocou a preocupação de utilizar-se um ciclo de cura adequado para impedir a fissuração prematura, ocasionada por gradientes térmicos (BASÍLIO, 1976).

1977 - Bauer e Olivan, continuaram o estudo da previsão da resistência do concreto através de ensaios acelerados em água em ebulição, agora utilizando três diferentes aglomerantes: o cimento Portland comum, o de alta resistência inicial e o de alto-forno. Foi a primeira vez em que se utilizou um cimento com adições de escória na cura acelerada.

1981 - Zanfelize estabeleceu correlações no ensaio acelerado em água quente, para prever a resistência do concreto com cimento Portland

comum, substituindo a cura em água fervente por tratamento à temperatura de 70°C.

1981 – Ibracon, Holanda e Vasconcelos, publicaram as experiências do Laboratório de Concreto da Eletronorte, da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no controle de peças pré-moldadas de concreto, com adição de pozolana, curadas a vapor. Nesse trabalho, observaram a variação da temperatura na câmara e no interior das peças, e também a variação de resistência à compressão de concretos submetidos à cura normal e a cura térmica. Na oportunidade, observou-se que, em idades avançadas, a resistência obtida na cura térmica era inferior à cura normal.

1983 - Ibracon, Dias e colaboradores, complementaram o trabalho iniciado em 1981. Nessa mesma reunião, Romero e Braga apresentaram as seguintes informações relativas à cura a vapor, utilizada na usina Hidrelétrica de Itaipu:

- O ciclo de cura deve ser obedecido;
- Ele apresentou queda de resistência em relação à cura normal;
- À temperatura de 65°C, o concreto apresentou baixa resistência imediatamente após o ciclo de cura, porém melhores resultados com a idade;
- À temperatura de 85°C, a resistência do concreto logo após o ciclo de cura foi elevada, mas não cresceu muito ao longo do tempo.

1985 - Birindelli retomou o estudo da previsão da resistência à compressão de concretos com cimento Portland de alto-forno, através da cura acelerada pelo método da água em ebulição. Neste trabalho, há as primeiras informações, através de levantamento bibliográfico, sobre ativação da escória pela temperatura de cura.

1988 - Camarini chegou às mesmas conclusões do trabalho desenvolvido por Romero e Braga ao estudar a cura térmica, em água quente a 65°C e 85°C, de argamassa com cimento Portland comum e adições de cinzas volantes.

1992 e 1993 - Battagin apresentou trabalhos sobre cura térmica em cimento Portland de alto-forno, com vários teores de escória, observando especialmente a hidratação da parcela de escória presente nesses cimentos. Sua conclusão foi que a temperatura de cura aumentou o grau de hidratação da escória.

O estudo da cura acelerada através de agentes térmicos tem sido pouco explorado. A divulgação de trabalhos foi mais intensa na década de 80, porém foram trabalhos mais informativos sobre as condições de cura, utilizando basicamente o mesmo aglomerante, ou seja, o cimento Portland de alta resistência inicial.

1995 - camarini apresentou estudos com cimento Portland de alto-forno, explorando a ativação da escória granulada através da temperatura de cura. Algumas das principais conclusões deste trabalho foram:

- a) O efeito principal da cura térmica está na aceleração da cinética das reações de hidratação pela temperatura na fase inicial;
- b) A temperatura de cura afeta o desempenho dos aglomerantes;
- c) Há queda de resistência mecânica com a idade quando se utilizam ciclos longos e temperaturas elevadas;
- d) Das misturas estudadas, aquelas com teor de escória em 50% e 70% foram as mais adequadas para cura térmica, não havendo diferença significativa entre elas.

2000 - Melo apresentou trabalho sobre a influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland concluindo que ciclos longos e temperaturas mais altas favorecem a formação de produtos hidratados com menor desempenho mecânico.

Sendo assim, conclui-se não serem numerosos os estudos sobre a cura térmica aplicada a peças pré-moldadas de cimento Portland de alta resistência inicial, e sendo esta uma técnica muito utilizada nas fábricas de blocos, constitui-se um campo de grande importância a ser investigado.

1.5 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é estudar a interferência da cura térmica aplicada a blocos de concreto pré-moldados, observando a influência do tempo de espera e da temperatura aplicada, no desenvolvimento da resistência.

O estudo será feito a partir de ciclos de 8 horas desde a mistura, tempo de espera e cura térmica seguida de resfriamento, considerando este um tempo ótimo a ser aplicado na prática, em fábricas de pré-moldados, possibilitando 3 turnos de trabalho.

1.6 Conteúdo e divisão do trabalho

Para atingir tal objetivo, o trabalho está dividido em 6 capítulos:

Capítulo 1**Introdução**

Revisão sobre a industrialização da construção e histórico resumido sobre peças pré-moldadas e blocos para alvenaria estrutural e de vedação. Relato sobre a situação da produção destas peças no Brasil e as vantagens da utilização destes materiais. Importância e consequências da cura térmica em ambiente controlado. Histórico dos estudos sobre a cura térmica no Brasil. Além disso, inclui objetivo geral, conteúdo e estrutura do trabalho.

Capítulo 2**Aspectos tecnológicos dos concretos utilizados em blocos**

Descreve a tecnologia de produção de blocos de concreto e equipamentos utilizados, assim como proporcionamento dos materiais, mistura moldagem, transporte e cura.

Capítulo 3

Materiais empregados no concreto para fabricação dos blocos e definições sobre a qualidade dos mesmos.

Capítulo 4**Hidratação das fases do cimento Portland comum;****Reações de hidratação do cimento x Resistência x Porosidade****Estrutura da pasta endurecida.****Capítulo 5**

Objetivos e efeitos da cura térmica nas propriedades das pastas de cimento Portland.

Ciclos de cura, suas fases: tempo de espera, período de elevação da temperatura, período isotérmico e de esfriamento. Condições das câmaras de cura térmica.

Capítulo 6**Produtos de hidratação do concreto submetido à cura térmica****Formação da etringita secundária, Método da maturidade.****Capítulo 7****Materiais e Métodos.**

Descrição do programa experimental, equipamentos utilizados e ensaios realizados.

Capítulo 8

Análises dos Resultados

Capítulo 9

Conclusões finais e recomendações para estudos complementares.

Capítulo 10

Referências Bibliográficas.

2. CONCRETO UTILIZADO EM BLOCOS

2.1 Aspectos tecnológicos dos concretos utilizados em blocos

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

O agregado é o material granular, tal como areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno, usado com um meio cimentante, para formar um concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A resistência do concreto é considerada como a propriedade mais importante do concreto, embora, em muitos casos práticos, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade sejam, de fato, mais importantes. A resistência fornece uma idéia geral da qualidade do concreto, pois ela está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 1997).

Nos sólidos existe uma relação inversa entre porosidade (fração de volume de vazios) e resistência. Conseqüentemente, em materiais de várias fases como o concreto, a porosidade pode se tornar um fator limitante da resistência. Embora a relação água/cimento seja o parâmetro mais importante na determinação da porosidade, e conseqüentemente da resistência, fatores como adensamento, condições de cura e outros podem também ter um efeito importante sobre a resistência (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Quando um concreto está plenamente adensado, considera-se sua resistência como inversamente proporcional à relação água/cimento. Esta relação foi estabelecida pela denominada “lei”, mas, na realidade uma regra, estabelecida por Duff Abrams em 1919, dada por:

$$f_{cj} = \frac{A}{B^{a/c}}$$

Equação 1 – Lei de Abrams

Onde:

f_{cj} = Resistência do concreto na idade j dias;

A e B = Constantes que dependem dos materiais empregados;

a/c = Relação água/cimento do concreto

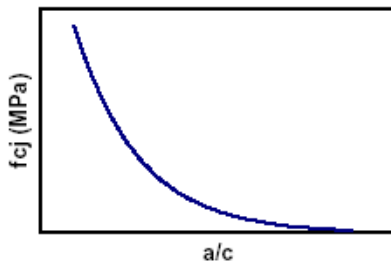


Figura 2 - Representação gráfica da Lei de Abrams

Para exemplificar a importância desta lei no caso dos concretos plásticos, Tartuce & Giovannetti (1990) dizem que um traço 1:7 poderá dar a mesma resistência que uma riquíssima dosagem de 1:4, dependendo unicamente dos teores de água/cimento, utilizando-se os mesmos materiais. Entretanto, estes autores ressaltam que não se pode concluir que traços pobres podem substituir, sem limites, as dosagens mais ricas. A prática exige que se empregue água suficiente para se obter um concreto *plástico* e *trabalhável*. Estes mesmos autores citam uma outra regra, a qual deve ser seguida: “Empregue a menor quantidade de água que lhe possa assegurar um concreto plástico”, ou seja, com a trabalhabilidade desejada.

Os concretos plásticos atendem a uma segunda lei conhecida como “Lei de Lyse”. Esta lei segue a seguinte regra: “A quantidade de água a ser empregada em um concreto com um determinado grupo de materiais (mesmos cimentos, agregado miúdo e graúdo), para obter-se uma dada trabalhabilidade, independe do traço deste concreto”. Na prática, para um dado grupo de materiais, existe uma relação água/materiais secos (H) constante para obter-se uma dada trabalhabilidade. (FRASSON, 2000)

Os concretos estruturais normais, chamados plásticos, caracterizam-se pelo elevado consumo de água, além da quantidade necessária à hidratação do cimento, para obtenção de uma mistura plástica e com consistência conveniente, capaz de ser, perfeitamente, adensada. Essa característica permite que esses concretos sejam aplicados com certa facilidade, sendo que a retirada do ar aprisionado às misturas, geralmente, é feita mediante equipamentos simples, tais como vibradores de imersão. (OLIVEIRA, 2004)

Os concretos “secos” utilizados na produção de blocos caracterizam-se pela baixa relação água/materiais secos, grande consistência, alta coesão e pela forma com que o ar aprisionado é

retirado. Segundo Marchand et al. (1996), concreto seco pode ser definido como um concreto com consistência superior aos concretos usuais (concretos plásticos), devido a menor quantidade de água empregada, geralmente, por causa da necessidade de desforma imediata. Essa característica, em particular, o torna um concreto levemente umedecido, também conhecido como concreto de slump-zero ou concreto com consistência de terra úmida, sendo necessário o emprego de equipamentos especiais para compactação (JUVAS, 1993). No caso de blocos, são utilizados equipamentos capazes de vibrar e comprimir simultaneamente (máquinas vibroprensas), com o objetivo de conferir às misturas alta compacidade.

A produção do bloco de concreto envolve uma tecnologia bastante peculiar. Diferente de um concreto convencional, o concreto para a produção de blocos não segue à risca a “Lei de Abrams”, com a sua conhecida regra da relação água/cimento. Portanto, neste caso, não vale a recomendação de reduzir a quantidade de água na mistura para melhorar a resistência mecânica. Ao contrário, via de regra, quanto mais água se coloca na mistura, maior será a resistência alcançada. Isto ocorre pois a água dosada confere à mistura uma plasticidade que facilita a prensagem do material nas formas da máquina. Existe uma umidade ótima na qual as misturas conseguem obter uma melhor compacidade, bem parecido como o que ocorre na compactação de solos, por exemplo. Evidentemente, existe uma quantidade limite acima da quais as peças não conseguem ser produzidas (FRASSON, 2000)

Para os concretos “secos” utilizados na produção de blocos, a umidade alcançada nas misturas é fundamental para que possa ser utilizada para a finalidade requerida. Esta umidade gira em torno de 6 a 8% para que as peças possam ser moldadas sem que haja excesso ou falta de água. Para Tango (1994), “a quantidade de água de cada mistura deve ser a maior possível, suficiente para que os blocos não se esboroem e não tão grande que faça com que os mesmos tenham dificuldade de desforma por aderência aos moldes, ou perda do formato adequado”.

As propriedades do concreto seco, no estado endurecido, estão intimamente ligadas às do estado fresco, de maneira muito mais pronunciada do que no concreto plástico (RODRIGUES, 1984). O concreto seco deve apresentar trabalhabilidade adequada a ser moldado com o equipamento disponível, além de possuir uma elevada coesão para que as peças mantenham-se inalteradas imediatamente após a desforma. Em se tratando de blocos e peças de concreto para pavimentação (PCP), as principais propriedades requeridas no estado endurecido são: textura superficial, que está relacionada com a

- 4 - Silo/balança de agregados;
- 5 - Silo de cimento;
- 6 - Máquinas vibro-prensas;
- 7 - Transportador de chapas;
- 8 - Misturadores;
- 9 - Câmaras de cura;
- 10 - Laboratório/oficina.

2.3 Etapas para produção de blocos:

- 2.3.1 Proporcionamento dos materiais;
- 2.3.2 Mistura;
- 2.3.3 Moldagem (vibro-prensagem);
- 2.3.4 Cura das peças.

2.3.1 Proporcionalamento dos materiais

A dosagem de um concreto “seco” é um procedimento mais complexo que a dosagem de um concreto plástico convencional pois a resistência a ser alcançada não depende somente da proporção entre os materiais constituintes mas também do grau de compacidade aplicado. Este, por sua vez, é função das características da vibroprensa empregada e do tempo de ciclo de produção estabelecido. Um método utilizado com sucesso em diversas fábricas do Sul do Brasil é descrito por Prudêncio; Frasson; Oliveira (2007 e 2008- Revista Prima). De um modo geral, o método baseia-se na formulação de uma mistura com um mínimo de vazios possíveis. Isto significa dizer que as dosagens visam alcançar maiores massas unitárias, ou seja, maior massa de material em um mesmo volume diminuindo o volume de vazios. Esta busca por um menor volume de vazios tem por objetivo encontrar um proporcionamento entre agregados que resulte em uma mistura mais compacta por ter relação direta com a resistência à compressão. O alcance destas propriedades vai depender muito do tipo de agregado e suas composições devido às diferentes granulometrias e formas dos agregados que vão compor os traços (FRASSON, 2000).

A quantidade de água deve ser estabelecida experimentalmente na própria fábrica e será função dos materiais utilizados e dos equipamentos disponíveis. Quanto mais água puder ser incorporada à mistura, para cada teor de cimento, maiores serão as resistências e

compacidades alcançadas. Entretanto, se esta quantidade for excessiva, ocorrerão problemas de desforma e deformação indesejáveis nas peças durante o transporte para a cura. (FRASSON, 2000)

A utilização de sensores de umidade é bastante recomendada devido ao fato do montante de água a ser utilizado influir significativamente na compactabilidade da mistura. Os sensores de umidade devem ser acoplados tanto nos misturadores como nos sistemas de abastecimento dos agregados, permitindo que se obtenha uma correta proporção de água, diminuindo desta forma a variabilidade da resistência, em um mesmo lote (FRASSON, 2000).

Na busca da qualidade e controle do traço empregado na produção dos blocos, os agregados e aglomerantes devem ser dosados em massa, visando um melhor controle sobre o proporcionamento destes. Na figura 5, podemos visualizar silos de abastecimento de materiais em fábrica de pré-moldados.

2.3.2 Mistura

É essencial que os ingredientes da mistura sejam adequadamente misturados de modo a produzir um concreto fresco no qual todas as partículas dos agregados estejam revestidas com pasta de cimento e que seja homogêneo em macro-escala e, portanto, apresentando propriedades uniformes (NEVILLE, 1997).

O tempo de mistura varia de acordo com o tipo de equipamento e seu tamanho, devendo ser seguidas as orientações do fabricante. A resistência média do concreto aumenta com o tempo da mistura, como foi mostrado pelas experiências de ABRAMS, (1918). A velocidade de crescimento diminui rapidamente após cerca de um minuto e não é significativa após dois minutos; No entanto, dentro do primeiro minuto, a influência do tempo de mistura é consideravelmente importante. (NEVILLE, 1997).

A mistura para produção de peças pré-moldadas é feita em misturadores que podem ser de eixo vertical (misturadores forçados) e horizontal (forçados e por gravidade). Um processo ineficiente de mistura pode acarretar em uma má homogeneização do material, provocando heterogeneidade do produto final. Por isso, a escolha do tipo e capacidade do misturador é fundamental. A capacidade deve ser compatível com o ciclo de produção da máquina vibro-prensa.

No caso de optar-se pela instalação do sensor de umidade no misturador, deve-se tomar especial atenção no seu posicionamento para

evitar heterogeneidades na mistura (FRASSON, 2000).

2.3.3 Moldagem vibro-compressão

Realizada a mistura, o material é conduzido à cuba de alimentação da vibro-prensa. Esta máquina é de fundamental importância nas características das peças pré-moldadas de concreto, pois possui a propriedade de imprimir elevados graus de compactação aos concretos “secos”, interferindo significativamente nas resistências à compressão, absorção e textura do material.

As máquinas vibro-prensas, figura 4, podem ser de funcionamento mecânico ou hidráulico. Elas diferenciam-se pelo grau de compactação que imprimem e sua capacidade de produção, que normalmente é medida por blocos/hora. Máquinas que permitem graus de compactação superiores são potencialmente capazes de produzir blocos de elevadas resistências e que podem mais facilmente atingir os outros requisitos normativos, tais como absorção, textura e retração, pertinentes a estes tipos de peças pré-moldadas.

Nesta fase da produção, são definidos os tempos de alimentação e de pré-vibração da gaveta da máquina. Para saber se o equipamento foi regulado adequadamente, ou seja, se os tempos adotados são suficientes para um bom enchimento das formas, faz-se a medição do tempo em que o contramolde leva para concluir a prensagem do bloco. Este último é chamado de tempo de vibro-compressão e é indicativo de um bom ou mau enchimento da forma. Tempos insuficientes conduzirão à obtenção de produtos porosos e de baixa resistência enquanto que tempos excessivos aumentarão o tempo de ciclo de produção e o desgaste do equipamento podendo até inviabilizar a produção das peças. (FRASSON, 2000).



Figura 4 – Máquina vibro-prensa utilizada na produção de blocos de concreto.



Figura 5 - Fábrica de blocos de concreto. Detalhe dos silos de cimento e agregados.

2.3.4 Transporte, Cura e Armazenamento

Terminada a prensagem das peças, deve-se proceder ao transporte para o local da cura. As chapas, onde são moldados os blocos, são posicionadas nas grades que serão conduzidas por empilhadeiras ou sistemas automáticos, dependendo do layout da fábrica, até as câmaras de cura. Normalmente, estas grades são construídas de perfis metálicos e recebem cerca de dez a vinte chapas metálicas. Esta operação deve ser cautelosa para evitar vibrações que possam danificar as peças recém produzidas.

Na figura 6, podemos ver em detalhe, o transporte mecânico das chapas metálicas com os blocos recém moldados.



Figura 6 – Detalhe do transporte mecânico das chapas com os blocos recém moldados.

A cura, definida como o conjunto de procedimentos necessários à correta hidratação do cimento, deve ser preferencialmente acelerada, feita em câmaras de vapor, a temperaturas de 60 a 70°C, por no mínimo seis horas. (FRASSON, 2000).

Os dois objetivos da cura são:

- impedir a perda precoce de umidade;
- controlar a temperatura do concreto durante um período

suficiente para que este alcance um nível de resistência desejado (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

O processo de cura é o responsável pelo ganho de resistência das peças e a diminuição de sua retração potencial (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Se não for feita cura acelerada, as peças devem ser mantidas úmidas por um período de 7 dias para posterior liberação para entrega. Após a cura, as peças devem ser paletizadas e armazenadas de forma a constituírem um layout que facilite sua identificação e carregamento dos caminhões que levarão o produto até as obras. A paletização facilita a operação de transporte e minimiza as quebras do produto, reduzindo os custos de reposição.

Para os procedimentos de cura acelerada, as chapas com os blocos são acomodadas em grades para posterior transporte com máquinas para as câmaras de cura, conforme nos mostra a figura 7.

Sendo a cura uma etapa importante no desenvolvimento da resistência das peças pré-moldadas, esta será o motivo principal desta pesquisa.



Figura 7 – Grades com as chapas metálicas, carregadas com os blocos deslocados para as câmaras de cura. Pode-se observar também conjunto de blocos já paletizados.

3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DO CONCRETO

Para entender o comportamento do concreto sob cura acelerada é preciso descrever, primeiramente, os materiais que compõem o concreto e a microestrutura que se forma, após o contato do cimento com a água, em condições normais de cura.

3.1 Definições:

Os materiais usados na confecção do concreto para produção de blocos são basicamente: cimento Portland, agregado graúdo e miúdo e água, podendo ainda ser empregados aditivos e pigmentos, os quais conferem características diferentes à mistura.

Para melhor compreensão dos fenômenos de hidratação da pasta e do endurecimento do concreto, o conhecimento das características de cada componente é de suma importância.

3.1.1 Cimento Portland

Conforme especificam as Normas Brasileiras para blocos (NBR 6136, 2006) qualquer tipo de cimento pode ser usado para sua produção, desde que obedeçam as respectivas normas de qualificação.

O cimento Portland é um material constituído principalmente de material calcário, alumina e sílica encontrada em argilas ou xisto. O processo de fabricação consiste essencialmente em moer a matéria prima, misturá-la intimamente em proporções adequadas e calcinar a mistura em um forno rotativo até uma temperatura de 1450° C (NEVILLE, 1997). Nesta temperatura, o material sofre uma fusão incipiente formando pelotas, o clínquer.

O clínquer é resfriado e moído até um pó bem fino, onde é adicionado um teor de gipsita, em geral, uma ou mais formas de sulfato de cálcio, para controlar o tempo de pega do cimento. O clínquer é formado por:

- fase silicato: silicatos tricálcico (C_3S) e silicatos dicálcico (C_2S);
- fase intersticial: fase aluminato (C_3A) e fase ferrita (C_4AF).

A composição química dos compostos presentes nos cimentos

Portland industriais não é exatamente aquela expressa pelas fórmulas abreviadas C_3S , βC_2S , C_3A e C_4AF . Durante o processo de formação do clínquer, em altas temperaturas, os elementos presentes no sistema e as impurezas (ex.: Mg, Na, K e S) possuem capacidade de entrar em soluções sólidas com cada um dos principais compostos, criando defeitos nas estruturas cristalinas. De certa forma, as imperfeições estruturais explicam a instabilidade dos compostos do cimento em meio aquoso. (DE MELO, 2000)

O exame de uma seção polida de uma amostra de clínquer por microscopia ótica de luz refletida revela que o C_3S aparece como cristais em placas hexagonais, o C_2S como grãos arredondados com bandas geminadas e o C_3A assim como o C_4AF como fases intersticiais (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A velocidade de reação de hidratação para cada composto do clínquer é diferente e suas reatividades têm aproximadamente a seguinte ordem: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. Vários fatores afetam essas reatividades, dentre eles: fabricação (tempo e temperatura no forno), finura, composição da fase líquida, temperatura de cura, presença de aditivos etc. (DE MELO, 2000).

A concentração e reatividade dos compostos do cimento, bem como a temperatura, controlam a velocidade da reação de hidratação. Como visto, a reatividade está relacionada à finura do cimento que também influencia na velocidade da reação. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rápida será a reação. O tamanho do grão e sua distribuição granulométrica têm importância no controle de qualidade dos cimentos, desde que exista uma relação entre dimensão da partícula e tempo de hidratação (grau de hidratação), conforme pode ser visto na Tabela 1 (TAYLOR, 1992).

Com valores aproximados de resistência à compressão de 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias, que superam em muito os valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente, o CP V ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados, e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade. (ABCP).

Tabela 1 – Relação entre dimensão das partículas de cimento Portland e Tempo de hidratação, sob condições normais de cura (TAYLOR, 1992).

Dimensão da Partícula (μm)	Tempo de hidratação (dias)
0,43 a 0,47	1
1,7 a 2,6	7
3,5 a 5,4	28
6,1 a 8,9	150
> 45	difícil
> 75	nunca se hidrata

No Brasil quase a totalidade dos cimentos comercialmente disponíveis possuem um ou mais tipos de adição. Isto se explica principalmente pela redução dos custos do cimento e por questões ambientais, pois a maioria destas adições são subprodutos industriais (PRUDÊNCIO, 1999).

Um dos principais tipos de adições são as pozolanas. Uma pozolana é definida como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes (MEHTA & MONTEIRO, 1994)

O cimento mais utilizado hoje, no sul do país, na fabricação de blocos e pavimentos é o CPV ARI RS (PRUDÊNCIO, BEDIN, OLIVEIRA, 2002), pois, de forma similar ao cimento ARI, este alcança níveis de resistência mecânica, nas primeiras idades, bastante elevado. Isto faz com que se tenha uma rápida liberação das grades e câmaras de cura, possibilitando que se tenha uma produção maior com menor índice de quebra. As especificações sobre as características necessárias para o CPV ARI RS são encontradas na NBR 5733/1991. Esse tipo especial de cimento ARI empregado no Sul do Brasil, se diferencia de um cimento ARI convencional por possuir um teor de cinza volante de aproximadamente 12%. Essa cinza é adicionada com o objetivo de baratear os custos de produção e seu desempenho mecânico é ligeiramente inferior ao ARI, principalmente nas primeiras idades. Sua

resistência a sulfatos é devida justamente à adição de cinza pozzolânica (cinza volante) e é comprovada por ensaios laboratoriais, tornando-o indicado para a produção de estruturas em ambientes agressivos.

Como o cimento a ser utilizado nesta pesquisa (ARI-RS) possui uma pozzolana, a cinza volante, como adição em sua composição, descreve-se abaixo suas principais características.

3.1.2 Cinza Volante

A cinza volante é um subproduto resultante da combustão de carvão pulverizado na produção de energia elétrica.

A principal influência de cinza volante, sobre o concreto fresco, se faz sobre a demanda de água e sobre a trabalhabilidade. Para uma mesma trabalhabilidade, a redução da demanda de água em um concreto devida à cinza volante, desde que não moída, é, geralmente, 5% a 15%, em relação a uma mistura com cimento Portland sem adições, com o mesmo teor de material cimentício; a redução é maior com relações água/cimento maiores.

Um concreto com cinza volante é coesivo e tem menor tendência à exudação. Esta influência sobre as propriedades do concreto fresco está vinculada à forma das partículas, muitas delas esféricas e maciças. Outro fator preponderante está nas cargas elétricas das partículas mais finas que ficam adsorvidas na superfície das partículas de cimento. Se houver uma quantidade suficiente de partículas de cinza volante para envolver as partículas de cimento, que, assim, fica defloculado, se reduz a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade.

Os produtos das reações pozzolânicas se assemelham muito ao C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland. No entanto as reações não se iniciam até certo tempo depois da mistura. O vidro na cinza volante se decompõe somente quando o valor do pH da água de poros for pelo menos de 13,2, e esse aumento da alcalinidade exige que uma parte do cimento Portland tenha se hidratado. Além disso, os produtos da reação do cimento Portland se precipitam na superfície das partículas de cinza volante, que atuam como núcleos. Uma consequência dessas reações iniciais é que os produtos quase sempre permanecem com a forma das esferas de cinza volante originais. Com o tempo, os produtos formados se difundem e se precipitam no interior do sistema de poros; o resultado é uma redução da porosidade capilar e, conseqüentemente, uma estrutura de poros mais finos (NEVILLE, 1982).

3.1.3 Agregados Graúdos

Os agregados graúdos empregados podem ser naturais (seixo rolado) ou de britagem (brita “0”), provenientes da cominuição de rochas estáveis. Estes últimos são mais indicados por apresentarem, geralmente, uma melhor aderência com a pasta de cimento, favorecendo a obtenção de resistências mecânicas mais elevadas.

Quanto à dimensão máxima característica, usualmente, emprega-se agregados com diâmetros inferiores a 9,5 mm (brita “0”), a fim de se evitar danos no equipamento, além de contribuir para a melhoria da textura superficial das peças (RODRIGUES, 1984). Segundo o referido autor, além das restrições granulométricas, os agregados graúdos devem cumprir com os requisitos básicos de qualidade, estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2006), resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Características recomendadas para agregados graúdos empregados na produção de peças pré-moldadas de concreto (NBR 7211 - ABNT, 2006).

Características	Tolerância
Material pulverulento	< 1,0 %
Partículas friáveis	< 2,0 %
Material carbonoso	< 1,0 %
Índice de forma	< 3,0 %
Abrasão "Los Angeles"	< 50%

3.1.4 Agregados Miúdos

Na produção das peças podem ser usados tanto agregados naturais (de rio ou cava) como de britagem (areia industrial). A escolha depende, prioritariamente, da disponibilidade na região. Mas, independente do tipo de agregado miúdo selecionado, ressalta-se que a forma do mesmo interfere na produção das peças. Segundo Oliveira (2004), a forma mais arredondada da areia natural facilita a moldagem.

Além disso, Rodrigues (1984) faz restrições quanto ao uso de areias grossas, isto baseado no fenômeno de interferência entre as partículas, o que dificulta a compactação.

De acordo com Ferreira (1991) e Medeiros (1993), o agregado

miúdo deve possuir uma distribuição granulométrica contínua, pois a falta dessa pode comprometer seriamente a peça. As areias naturais geralmente apresentam deficiências em algumas peneiras. Isto ocorre principalmente nos diâmetros menores e faz-se necessário então o uso de combinações com areias finas para obter-se um melhor desempenho. As areias empregadas na produção dos blocos devem ainda cumprir outros requisitos, conforme sugere a Tabela 3.

Tabela 3 - Características recomendadas para agregados miúdos empregados na produção de peças pré-moldadas de concreto (NBR 7211 - ABNT, 2006) .

<u>Características</u>	<u>Tolerância</u>
Material pulverulento	< 3,0 %
Teores de Argila	< 1,5 %
Material carbonoso	< 1,0 %
Impurezas Orgânicas	< 300 ppm *

* Areias com impurezas orgânicas superior a 300 ppm deverão ser submetidas a ensaios mais conclusivos.

3.1.5 Água

Assim como as recomendações para concretos convencionais (plásticos), a água para produção de blocos deve ser isenta de substâncias que possam vir a prejudicar as reações de hidratação do cimento, sendo que, geralmente, a água potável, fornecida pela rede normal de abastecimento, é satisfatória. No caso do uso de águas não tratadas, estas devem ser analisadas antes do seu emprego, para evitar problemas futuros (RODRIGUES, 1984).

A qualidade da água tem um papel importante: impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchamento da sua superfície. A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substâncias inorgânicas em teores excessivos (NEVILLE, 1997).

3.1.6 Aditivos

A NBR 11768 (ABNT, 1992) define os aditivos como “*produtos que adicionados em pequenas quantidades a concretos e argamassas de*

cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

Na fabricação de blocos de concreto, os aditivos mais empregados são os incorporadores de ar. Estes aditivos são substâncias orgânicas em solução aquosa que, adicionadas ao concreto, introduzem uma quantidade de minúsculas bolhas de ar (RODRIGUES,1984). Constituem-se de sais de resinas de madeira, materiais protéicos, ácidos graxos, além de alguns detergentes sintéticos (MEHTA E MONTEIRO, 1993), sendo utilizados em quantidades que variam de 100 a 500 ml/50 Kg de cimento, dependendo da mistura e do tipo de aditivo empregado. (LEVITT,1982)

Quando adicionados aos concretos plásticos, estes aditivos melhoram a trabalhabilidade e a coesão, além de facilitar a compactação das misturas devido ao seu papel simultâneo de fluido e agregado fino, desempenhado pelas bolhas de ar. No estado endurecido, a perda de resistência à compressão por causa do ar incorporado, é, em parte, amenizada pelas reduções da relação água/cimento e da porosidade do concreto, devido ao efeito plastificante e à diminuição do atrito interno, causados pelo aditivo.

A tabela 4 mostra o efeito predominante do aditivo incorporador de ar na pasta de cimento.

Tabela 4 - Efeito predominante do aditivo incorporador de ar na pasta de cimento

<i>Incorporador de ar</i> Efeito predominante na pasta de cimento	
<i>Molécula presente no aditivo</i>	Cadeia de hidrocarboneto não-polar com um grupo polar
<i>Interface ar-água</i>	Grupos polares são orientados em direção à água, reduzindo a tensão superficial favorecendo a formação de bolhas de ar.
<i>Interface sólido-água</i>	Grupo polar liga-se ao sólido e o grupo não polar fica orientado para a água, tornando a partícula de cimento hidrófoba. O ar desloca a água e fica ligado às partículas de cimento como bolhas.

4. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Levando em conta as implicações da variação da temperatura de cura nas propriedades do concreto, é de suma relevância neste estudo teórico, descrever as características do meio ligante e sua estrutura interna.

O concreto é um material estrutural cuja estrutura é heterogênea e altamente complexa. Sabe-se da engenharia dos materiais que as propriedades de um material têm sua origem na sua estrutura interna, podendo as suas propriedades ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material.

A nível macroscópico, o concreto pode ser considerado como um material bifásico, consistindo de partículas de agregado dispersas em uma matriz de cimento (MEHTA E MONTEIRO, 1993).

A nível microscópico, começam a surgir as complexidades da estrutura do concreto, mostrando que as duas fases da estrutura não estão distribuídas homogeneamente, uma em relação à outra, nem são em si mesmas homogêneas. Na presença do agregado, a estrutura da pasta, na vizinhança de partículas grandes de agregado, é comumente muito diferente da estrutura da matriz de pasta ou argamassa do sistema. Assim, muitos aspectos do comportamento do concreto sob tensão podem ser explicados somente quando a interface pasta de cimento-agregado é tratada como uma terceira fase da estrutura do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1993).

Esta terceira fase, a zona de transição, é uma camada delgada, de 10 a 50 μm de espessura ao redor do agregado grão e é geralmente mais fraca do que os outros dois componentes principais do concreto, exercendo uma influência muito maior sobre o seu comportamento mecânico do que pode ser esperado pela sua espessura (MEHTA E MONTEIRO, 1993).

A região do agregado é predominantemente responsável pela massa específica, pelo módulo de deformação e pela estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades do concreto dependem, em grande parte, da densidade e resistência do agregado. A porosidade, a forma e a textura do agregado também afetam as propriedades do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1993). Esta região é, geralmente, mais resistente do que as outras, logo, não tem influência direta sobre a resistência do concreto, exceto no caso de alguns agregados altamente porosos, fracos, deletérios e com forma inadequada.

O tamanho e a forma do agregado grão podem afetar a

resistência do concreto de modo indireto. Por exemplo, quanto maior o tamanho do agregado no concreto e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície inferior do agregado, enfraquecendo assim a zona de transição (interface pasta-agregado). É o fenômeno conhecido como exsudação interna (MEHTA E MONTEIRO, 1993).

Para o presente trabalho, o fenômeno da exsudação interna é minimizado, tendo em vista que para a produção de blocos e PCP, são utilizados agregados graúdos com $D_{\text{máx}} \leq 9,5\text{mm}$ (brita 0) e com bom índice de forma, além do conteúdo de água das misturas ser baixo.

Considerando a pasta de cimento Portland endurecida, a região que exerce maior influência nas propriedades (na permeabilidade, na resistência mecânica e química) do concreto, este trabalho a elege como foco principal da investigação, buscando discutir o processo de hidratação do meio ligante, com e sem o aumento da temperatura, de modo a balizar o estudo experimental da etapa seguinte.

4.1 Estágios da hidratação do cimento Portland

As fases silicato (C_3S e βC_2S) constituem cerca de 70% a 90% do cimento Portland e quando em contato com água produzem os mesmos compostos hidratados, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e o $Ca(OH)_2$ (portlandita).

Do ponto de vista da resistência, é importante que o cimento Portland desenvolva tanto quanto possível o C-S-H, porque os silicatos de cálcio (que representam cerca de 80% da massa total do cimento Portland) são responsáveis pelo desenvolvimento da resistência do concreto. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Uma das maneiras para monitorar a evolução da hidratação das fases do cimento Portland é através do registro da taxa de desenvolvimento de calor, tendo em vista que a reação é exotérmica e que o fluxo de calor é proporcional à velocidade de reação (JAWED et al., 1983).

A Figura 8 mostra a curva da velocidade de despreendimento de calor em função do tempo. Pode-se notar que o primeiro pico, que é muito alto corresponde à hidratação inicial na superfície das partículas, envolvendo principalmente o C_3A . Este período de grande velocidade de hidratação é muito curto e seguido pelo período de indução, durante o qual a velocidade é bem pequena. Este período dura uma ou duas horas

durante as quais a pasta de cimento é trabalhável (JAWED, SKALNY & YOUNG, 1983).

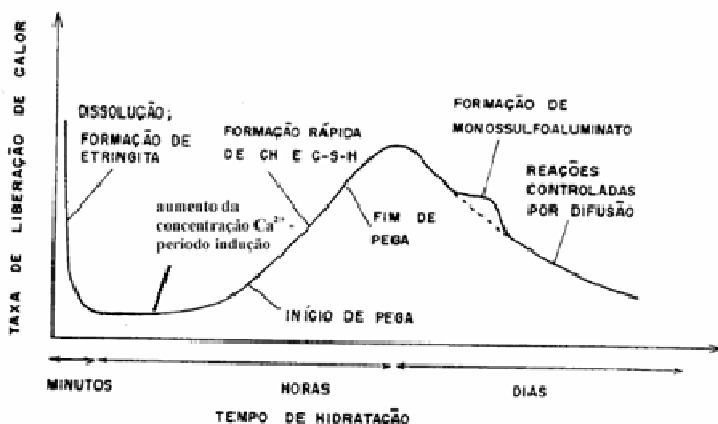


Figura 8 - Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum (JAWED, SKALNY & YOUNG, 1983)

1º. Estágio – Período da Mistura (pré-indução)

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio tendem a entrar em solução, e fase líquida torna-se rapidamente saturada em várias espécies iônicas. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Neste estágio, início da hidratação (cerca de 10 minutos), uma grande quantidade de calor é liberada, conforme pôde ser visto na Figura 8. Este fenômeno coincide com a formação de bastões pequenos e grossos de AFt (250nm X 100nm), na superfície e na solução, próximo à fase aluminato anidra. Em seguida, esta camada retrai-se devido à secagem e os cristais de AFt ficam próximos à superfície dos grãos do clínquer. A taxa de desenvolvimento de calor diminui rapidamente, iniciando o período de indução, durante o qual a concentração de íons Ca^{++} na fase líquida alcança a supersaturação com relação ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Inicia-se a nucleação e o crescimento dos produtos CH e C-S-H. Nesse estágio de desenvolvimento da estrutura, há também formação de camadas finas de C-S-H ao redor dos grãos do clínquer (CAMARINI, 1995; GARTNER & GAIDIS, 1989; JAWED et al., 1983; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

2º. Estágio – Período de indução

O rápido aumento tanto do pH como do teor de Ca^{++} da água da mistura torna mais lenta a dissolução da fase do clínquer. O fluxo térmico fica consideravelmente mais lento, mas nunca pára. Uma pequena quantidade de C-S-H é formado, e se existe equilíbrio certo entre íons de alumínio e sulfato, quantidades reduzidas de etringita e aluminato de cálcio hidratado são formados. A fase aquosa torna-se saturada de íons Ca^{++} , mas não existe precipitação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (AITICIN, 2000).

3º. Estágio – Início da pega

A reação de hidratação é subitamente ativada quando o óxido de cálcio começa a precipitar-se. Isso ocorre quando não existe praticamente mais silicato na fase aquosa (AITICIN, 2000). Ao final do período de indução, inicia-se a cristalização do CH e forma-se um novo tipo de C-S-H, marcando um novo aumento na velocidade de hidratação, com maior desenvolvimento de calor que caracteriza o início de pega ou o início do período de aceleração (GARTNER & GAIDIS, 1989). Esse período de aceleração, em geral com duração entre 4 e 8 horas, apresenta um aumento significativo na quantidade produzida de material hidratado, através do crescimento inicial dos mesmos. As reações são rápidas, com o aumento de calor liberado, que atinge o seu valor máximo no final desse período. Isto está relacionado à velocidade de crescimento dos cristais de CH e à dissolução do C_3S . O final desse estágio é o fim de pega (CAMARINI, 1995; JAWED et al., 1983).

4º. Estágio – Endurecimento

Na maioria dos cimentos Portland, existe menos sulfato de cálcio do que o necessário para reagir com a fase aluminato, de tal forma que durante a pega, íons SO_4 -são totalmente consumidos inicialmente pela formação de etringita. Isso ocorre usualmente entre 9 e 15 horas depois do início da mistura. Nesse momento, a etringita torna-se uma fonte de sulfato para formar o monossulfoaluminato com a fase aluminato remanescente. Essa reação gera calor e leva à aceleração da hidratação das fases silicato (AITICIN, 2000).

Os produtos de hidratação formados durante os primeiros estágios são freqüentemente chamados de produtos externos porque eles crescem fora dos grãos de cimento, na fase intersticial aquosa. Eles aparecem como uma rede porosa e frouxa de C-S-H, de agulhas de etringita, de monossulfoaluminato e de cristais hexagonais amontoados de portlandita (AITICIN, 2000).

5º. Estágio – Redução da velocidade

Neste estágio da hidratação, os grãos de cimento estão cobertos por uma camada de hidratos, a qual vai se tornando cada vez mais espessa. É cada vez mais difícil para as moléculas de água chegarem às partes não hidratadas das partículas de cimento, atravessando essa espessa camada. A hidratação vai se reduzindo porque é controlada predominantemente pela difusão das moléculas de água através das camadas de hidratos, e a pasta de cimento hidratada se parece com uma compacta pasta “amorfa” conhecida como produto interno (AITICIN, 2000).

A hidratação do cimento Portland pára quando não existe mais fase anidra ou quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas (sistemas muito densos e defloculados), ou ainda quando não existe mais água disponível, caso isso aconteça (relação água/aglomerante muito baixa) (AITICIN, 2000).

A velocidade de reação, nesta fase, diminui bastante (período de desaceleração com duração de 12 a 24 horas), marcada pela queda na taxa de desenvolvimento de calor, apesar do crescimento contínuo dos compostos hidratados e do desenvolvimento da microestrutura. A continuidade da hidratação deixa de ser pelo mecanismo de dissolução-precipitação, passando a um novo processo que é o de difusão iônica (CAMARINI, 1995; JAWED et al., 1983). A reação prossegue lentamente e em velocidade cada vez menor pelo processo de difusão iônica, com a taxa de desenvolvimento de calor muito baixa. Ocorre a densificação gradual da microestrutura (CAMARINI, 1995; JAWED et al., 1983).

Grãos menores do que $5\mu\text{m}$ se hidratam completamente até o final da pega do cimento, proporcionando a formação de uma camada externa ("outer") de C-S-H no espaço originalmente ocupado pela água. Na etapa da reação que ainda é controlada quimicamente por dissolução-precipitação, há a formação de uma camada interna de C-S-H ("inner"), quando a partícula se dissolve deixando um espaço vazio (carapaça vazia), conhecido como "grão de Hadley". Essas carapaças começam a formar-se por volta de 12 horas após o início da hidratação, sendo mais perceptível após 18 horas. Elas não se constituem numa barreira impermeável para o fluxo de íons dissolvidos, pois à medida que a hidratação prossegue tanto o espaço interno quanto o externo são progressivamente preenchidos com compostos hidratados (DIAMOND, 1986). Os grãos tornam-se completamente envolvidos após 4 horas e a envoltória sobre a superfície dos grãos anidros cresce para fora dos mesmos. Após 12 horas, a espessura dessa envoltória é da ordem de

0,5µm a 1,0µm (SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

A quantidade de C_3A presente na maioria dos cimentos é relativamente pequena mas o seu comportamento e a sua relação estrutural com as outras fases o tornam interessante. A reação do C_3A puro com a água é muito violenta e resulta um enrijecimento imediato da pasta, conhecido como pega instantânea. Para evitar que isso aconteça, adiciona-se gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ao clínquer do cimento. O primeiro pico na velocidade do calor desprendido, normalmente observado nos primeiros cinco minutos após a adição da água, significa que se formou diretamente um pouco de aluminato de cálcio durante esse período, não tendo se estabelecido ainda as condições para o retardamento pelo gesso (NEVILLE, 1997).

Inicialmente, ao redor das partículas de C_3A , forma-se uma camada de etringita ($Af = C_3A \cdot (C.S)_3 \cdot H_{32}$), e, durante a sua formação, a velocidade da reação diminui gradualmente. Acredita-se que se forma uma camada semipermeável de Af na superfície do C_3A em hidratação, o que impede a difusão dos íons SO_4^{--} , OH^- e Ca^{++} , diminuindo a reação e resultando num período de indução, como no caso da hidratação dos silicatos (CAMARINI, 1995; JAWED et al., 1983).

Quando a fase líquida do sistema hidratado torna-se deficiente de íons SO_4^{--} e íons Ca^{++} , resultado do consumo total da gipsita, a camada de Af rompe-se e o C_3A ainda disponível reage com Af , transformando-se em monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($AFm = C_3A \cdot (C.S) \cdot H_{12}$). Este momento coincide com o segundo pico de liberação de calor. Por fim, o C_3A remanescente reage com a água e formam-se novos compostos hidratados (aluminatos de cálcio hidratados) (JAWED et al., 1983).

O gesso não somente reage com o C_3A , pois com o C_4AF forma ferro-sulfato de cálcio e sulfoaluminato de cálcio, e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos. A quantidade de gesso a ser adicionada ao clínquer do cimento deve ser cuidadosamente observada; em particular, um excesso de gesso leva a uma expansão e conseqüente desagregação da pasta de cimento. Um teor ótimo de gesso resulta numa velocidade desejável da reação nos primeiros estágios e evita a elevada concentração local de produtos de hidratação. Como conseqüência, se reduz o tamanho dos poros da pasta de cimento e se aumenta a resistência (NEVILLE, 1997).

A hidratação da fase ferrita (C_4AF) ocorre paralelamente à do C_3A , com formação de produtos análogos (Af e AFm). A reação é mais lenta comparada ao C_3A e desenvolve menos calor. Em presença de

gipsita conjuntamente com o óxido de cálcio, como ocorre no cimento Portland, a reação de hidratação torna-se ainda mais lenta (DE MELO,2000).

A tabela 5 descreve as reações básicas de hidratação do cimento portland e relaciona com seu significado físico.

Tabela 5 - Significado físico das reações básicas de hidratação do cimento Portland (JAWED, SKALNY E YOUNG,1983)

Estágio da reação	Processo Químico	Processo Físico	Importância nas propriedades mecânicas
<i>Primeiros minutos</i>	* Dissolução inicial rápida dos sulfatos alcalinos e aluminatos; Inicial hidratação do C3S ; formação de AFt	* Alta taxa de evolução de calor	* Mudanças na composição da fase líquida podem influenciar a subsequente pega.
<i>Primeiras Horas (período de indução)</i>	* Diminuição dos silicatos, mas aumento na concentração de Ca^{2+} , começam os núcleos de formação de CH e C-S-H; Concentração de Ca^{2+} atinge o nível de supersaturação.	* Formação dos produtos de hidratação inicial; baixa taxa de evolução de calor, contínuo aumento de viscosidade.	* Formação das fases AFt e AFm podem influenciar a pega e a trabalhabilidade. Hidratação dos silicatos de cálcio determinam o início da pega ao final do período de indução.
<i>Cerca de 3 a 12 horas (estágio de aceleração)</i>	* Reação química rápida do C3S para formar C-S-H e CH; diminui a supersaturação de Ca^{2+} .	Rápida formação de hidratos produz solidificação e redução na porosidade; alta taxa de evolução de calor.	Mudança de consistência plástica para rígida (início e final de pega); desenvolvimento de resistências iniciais.
<i>Estágio após aceleração</i>	* Formação de C-S-H e CH controlada por difusão; recristalização da AFt para AFm e alguma polimerização dos silicatos, a hidratação do C2S torna-se significativa.	Diminui a evolução de calor, contínuo decréscimo na porosidade; formação de ligações partícula-partícula e pasta-agregado.	Contínuo desenvolvimento de resistência, diminuindo a taxa; diminui a fluência; a porosidade e a morfologia do sistema hidratado determinam a resistência final, estabilidade volumétrica e durabilidade

4.2 Hidratação do cimento x Resistência x Porosidade

Quando os compostos de silicatos anidros entram em contato com a água, sua hidratação começa a ter lugar através da solução. Em outras palavras, a fase líquida se torna saturada com vários íons que combinam para formar diferentes produtos hidratados que começam a preencher o espaço originalmente ocupado pela água. Num ponto qualquer do processo de hidratação, os espaços não preenchidos entre as partículas de cimento consistirão de vazios e de poros capilares. Com a hidratação crescendo e a porosidade capilar decrescendo, o movimento da umidade torna-se lento. Acredita-se que a hidratação subsequente das porções não hidratadas das partículas grandes de cimento é um processo lento através das reações de estado sólido (AÏTCIN, 2000).

Estudos feitos com microscópio eletrônico de varredura têm mostrado que os produtos iniciais da hidratação, formados quando existe muita água e espaço vazio no sistema cimento-aglomerante, consistem de flocos de grandes cristais que geram um considerável volume de vazios. Uma vez que os produtos iniciais da hidratação cristalizam-se fora, no espaço preenchido pela água envolvendo as partículas de cimento (isto é, fora dos limites originais da partícula de cimento em hidratação), os pesquisadores referem-se a eles como “produtos externos”. De outro lado, os produtos de hidratação das reações do estado sólido, formados dentro dos limites originais das partículas de cimento em hidratação, são chamados de “produtos internos” e são mais compactos e menos cristalinos (MEHTA E MONTEIRO, 1993; AÏTCIN, 2000).

Como a resistência da pasta hidratada do cimento Portland é derivada principalmente das forças de van der Waals, segue-se que, quanto mais compactos (isto é, livre de poros grandes) e menos cristalinos forem os produtos de hidratação, maior será a resistência. Isso explica porque, numa pasta de cimento hidratada, o caminho da ruptura é através dos produtos externos e não dos produtos internos (AÏTCIN, 2000).

Então, do ponto de vista da resistência da pasta hidratada de cimento, é altamente desejável uma microestrutura similar à dos produtos internos, para isso eliminando-se de alguma forma os produtos externos (MEHTA E MONTEIRO, 1993; AÏTCIN, 2000).

Entretanto, existe um tipo de porosidade que não pode ser evitada, a saber, a contração química acompanhando a hidratação das fases silicatos. O volume final da pasta de cimento hidratado é de 8% a 10% menor do que o volume total dos silicatos anidros e da água. Essa

contração volumétrica faz com que a pasta de cimento hidratado retraia durante o processo de hidratação quando não é adequadamente *curada*. Como parte desta retração será contida pelo esqueleto dos agregados, uma malha de microfissuras ultrafinas se desenvolve dentro da pasta hidratada de cimento. A extensão dessa malha de fissuras muito finas depende da quantidade da fase silicato anidro que se hidratou e da importância da contenção pelo agregado. (AİTCIN, 2000)

Os principais fatores que afetam a porosidade da fase do cimento hidratado são a relação do volume de água disponível, do volume da fase do silicato não hidratado e da quantidade de ar incorporado durante a mistura (AİTCIN, 2000).

Quando a relação água/cimento hidratada é reduzida, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras na pasta de cimento fresca. Como resultado, existe menos porosidade capilar e menos espaço livre para os produtos externos se desenvolverem (AİTCIN, 2000).

Além disso, se existe menos água disponível, a água torna-se rapidamente saturada com os íons responsáveis pelo desenvolvimento dos produtos externos da hidratação. Como as partículas de cimento estão agora mais próximas umas das outras, os produtos externos têm menos distância a cobrir para desenvolver uma ligação inicial entre as partículas de cimento. Isso explica por que pastas de cimento com baixa relação água/ cimento desenvolvem resistências mais rapidamente. Finalmente, como as partículas de cimento estão mais próximas umas das outras e rapidamente ligadas, o movimento da umidade torna-se lento, favorecendo a formação de produtos internos durante a hidratação (AİTCIN, 2000).

Existem evidências de que, mesmo depois de muitos anos de idade, há ainda no concreto com baixa relação a/c, partículas de cimento não hidratadas e partículas de material cimentício que não reagiram (AİTCIN, 2000).

4.3 Estrutura da pasta endurecida

A estrutura endurecida formada na pasta de cimento Portland compõe-se basicamente de sólidos, vazios e água, conforme é descrito a seguir.

4.3.1 Sólidos

A microestrutura da pasta possui várias fases que não estão uniformemente distribuídas nem são uniformes em tamanho e morfologia. Nos sólidos, as heterogeneidades microestruturais podem levar a efeitos negativos sobre a resistência mecânica e outras propriedades relacionadas a ela, porque estas propriedades são controladas pelos extremos microestruturais, e não pela microestrutura média (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H) constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland, completamente hidratado. Sua morfologia varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino. A resistência mecânica do material é principalmente atribuída a forças de Van der Waals, devido à estrutura em camadas com uma área específica elevada, com o tamanho dos poros do gel (distância sólido-sólido) ao redor de 18\AA (MEHTA E MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1982; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

Os cristais de hidróxido de cálcio ou portlandita (CH) constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Há tendência em formar cristais grandes ($1\mu\text{m}$), sob a forma de prismas hexagonais distintos (formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas). A presença de uma quantidade considerável de Ca(OH)_2 , que tem maior solubilidade do que C-S-H, no cimento Portland hidratado tem efeito desfavorável sobre a resistência química a soluções ácidas. A morfologia é afetada pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e por impurezas presentes. O cristal de CH é o único composto da pasta que ocorre numa forma relativamente pura, com pequena quantidade de íons incorporados à sua estrutura. Nas primeiras idades, o CH é facilmente encontrado em grandes vazios presentes na pasta de cimento. É menor o potencial de contribuição para a resistência mecânica, devido às forças de Van der Waals, consequência de uma área específica muito menor (MEHTA E MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1982; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

Os sulfoaluminatos de cálcio hidratados ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida, tendo um papel menor na relação estrutura-propriedade. Nas primeiras idades é favorecida a formação da etringita (cristais prismáticos aciculares) que se transforma em monossulfato hidratado (cristaliza em placas hexagonais), sendo sua presença desfavorável à resistência química a soluções sulfatadas. As

fases AFt, AFm e C-A-H apresentam uma composição química muito variável e contêm uma quantidade substancial de outros íons incorporados. Tipicamente, os cristais da fase AFt são prismáticos aciculares e os cristais da fase AFm têm forma de placas hexagonais não empilhadas, mas agrupadas por ligações face-aresta (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

4.3.2 Vazios

Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos na pasta. O espaço não ocupado pelo cimento ou pelos produtos de hidratação consiste de vazios capilares, sendo o volume e o tamanho dos capilares determinado pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento pré-misturada. Não é a porosidade total, mas a distribuição do tamanho dos poros que controla efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações de volume de uma pasta de cimento endurecida.

Os poros grandes, vazios capilares maiores do que 50nm de uma pasta, referidos na literatura (MEHTA E MONTEIRO, 1994) como macroporos, influenciam principalmente a resistência mecânica e a permeabilidade, enquanto os poros pequenos, aqueles vazios menores do que 50nm, referidos como microporos, influenciam mais a retração por secagem e a fluência. As quantidades e o significados dos vazios presentes na pasta de cimento Portland podem ser classificados conforme a figura 9 (DE MELO,2000).

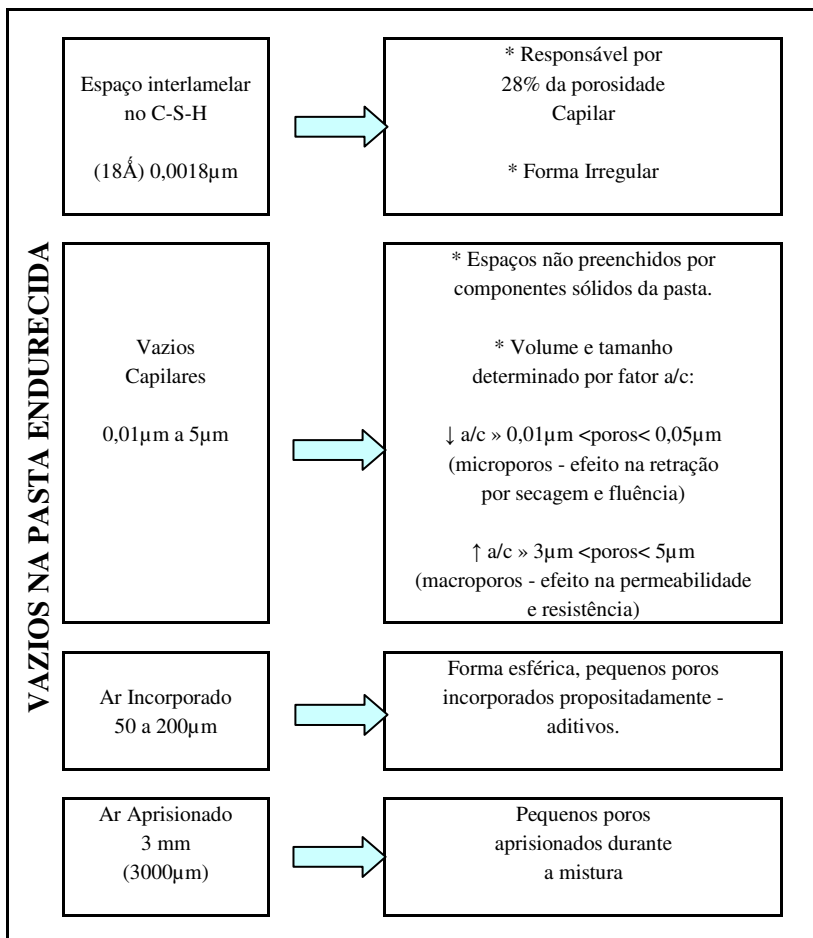


Figura 9 - Quantidades e significado dos tipos de vazios presentes na pasta de cimento Portland (DE MELO,2000).

4.3.3 Água

Dependendo da umidade ambiente e da sua porosidade, a pasta de cimento não tratada é capaz de reter uma grande quantidade de água. Assim, do mesmo modo que existem as fases sólidas e os vazios na pasta endurecida de cimento Portland, a água pode estar presente de várias formas. A classificação da água está baseada no grau de

dificuldade com o qual ela pode ser removida (vide Figura 10)

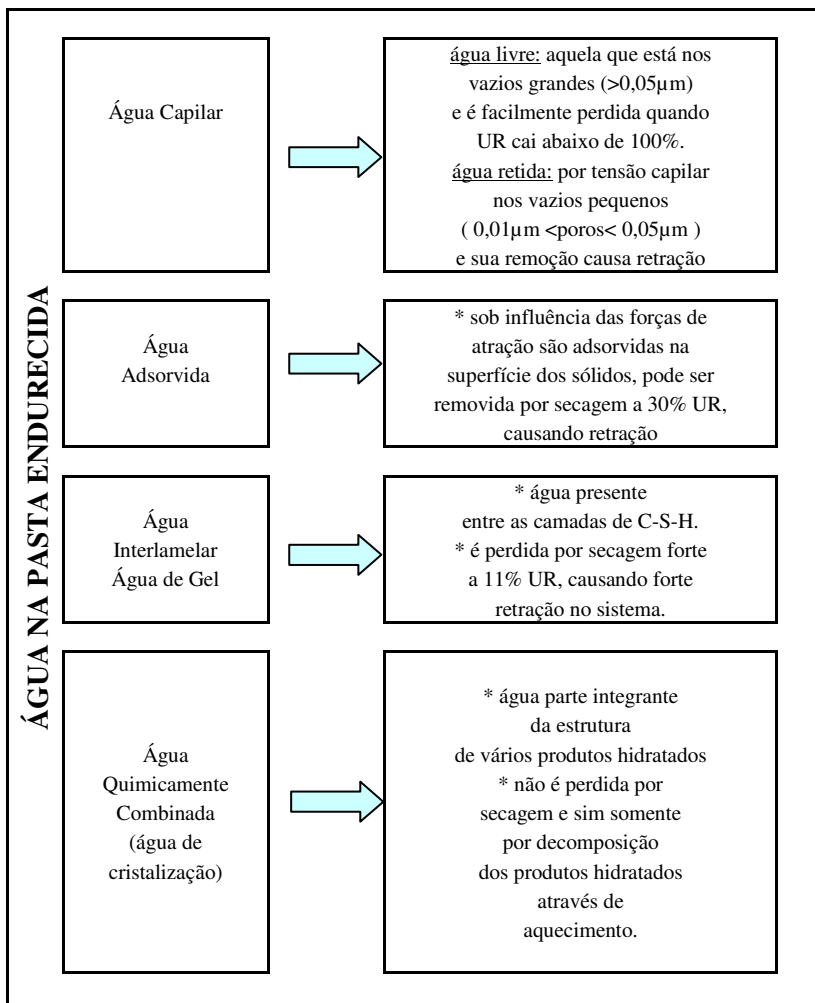


Figura 10 - Tipos de águas presentes na pasta de cimento Portland (DE MELO, 2000).

5. CURA TÉRMICA

5.1 Objetivos da cura térmica

Nas indústrias de pré-moldados, utilizam-se técnicas de cura térmica a vapor para acelerar o ganho de resistência mecânica do concreto em idades iniciais, possibilitando uma resistência mínima para desforma, manuseio ou utilização precoce.

O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento até uma condição desejável (NEVILLE, 1997).

A elevação da temperatura de cura acelera as reações químicas de hidratação, favorecendo as resistências iniciais do concreto, mas uma temperatura mais alta pode prejudicar a resistência após os 7 dias. A explicação é que uma hidratação inicial rápida aparentemente forma produtos com uma estrutura fisicamente mais pobre, provavelmente mais porosa, de modo que uma fração dos poros permanecerá sempre não preenchida (NEVILLE, 1997).

Os métodos de cura que não utilizam o vapor d'água para a obtenção do calor classificam-se em: elétrico, a óleo quente e por radiação infravermelha (ACI, 1987; CAMARINI, 1995).

Conforme descreve CAMARINI, 1995, as técnicas possíveis de serem utilizadas, tendo a *energia elétrica como fonte de calor* para acelerar a cura, são várias:

- Utilização da própria argamassa ou concreto fresco como condutor elétrico;
- Introdução de fios ou barras no interior das peças para produzir calor;
- Utilização das armaduras como condutores;
- Aquecimento das formas;
- Distribuição de fios em toda massa.

Apesar dessas opções, há uma série de inconvenientes que envolve essa técnica: as peças esbeltas tendem a fissurar, provavelmente devido ao esfriamento rápido que causa tensões térmicas, empenamento das formas metálicas devido às diferenças de temperatura entre a face externa e a interna em contato com a peça, e a perda de umidade muito rápida das peças prejudicando o desenvolvimento das reações de hidratação, e, conseqüentemente, da resistência mecânica.

A técnica de aquecimento por *raios infravermelhos* tem aplicação limitada na aceleração da cura das argamassas e concretos. A radiação é aplicada nas formas e o calor transmitido às peças. Há poucas informações a respeito deste método.

Os métodos que utilizam a cura em *elevadas temperaturas e atmosfera saturada de vapor* são os mais utilizados, e levam vantagem sobre os outros métodos de cura acelerada por propiciar o ambiente que envolve as peças saturado de vapor, não permitindo uma secagem prematura, minimizando a retração e a conseqüente formação de fissuras. Assim sendo, favorece a hidratação e o desenvolvimento da resistência mecânica, sendo muito importante, principalmente para produção de peças que dispensam o emprego de moldes, como exemplo, blocos e tubos.

A *cura térmica saturada de vapor* pode ser realizada de duas maneiras:

- Com pressão e temperaturas elevadas (acima de 100° C), conhecida como cura em autoclave;

- à pressão atmosférica, com temperaturas inferiores a 100° C.

Na *cura térmica a vapor em autoclave*, as temperaturas variam entre 160° C e 210° C e, as pressões, de 6 a 20 atm. Essas condições são aplicáveis às misturas que contêm cimento Portland e sílica ativa, para acelerar o efeito pozolânico, isto é, propicia-se a reação entre a cal liberada na hidratação do cimento com a sílica adicionada à mistura, formando o silicato de cálcio hidratado adicional, o que contribui com aumento da resistência mecânica. O cimento proporciona resistência suficiente para o manuseio antes da autoclavagem, podendo ser substituído, parcial ou totalmente, por outro aglomerante de composição adequada.

A *cura térmica a vapor à pressão atmosférica* é desenvolvida com temperaturas que variam entre 40° C e 100° C, com o objetivo de *acelerar o endurecimento*. É o método mais difundido no meio técnico e, atualmente, mais utilizado no país (CAMARINI, 1995).

Alguns trabalhos demonstram uma perda de resistência em longo prazo, em concretos submetidos à cura térmica, que pode estar associada à presença de fissuras muito finas causadas pela dilatação de bolhas de ar na pasta de cimento; a dilatação térmica do ar é pelo menos duas ordens de grandeza maior do que a do material sólido que o circunda. Essa dilatação é contida de modo que o ar fica sob pressão, induzindo tensões na pasta que o envolve. Estas tensões podem induzir a formação de fissuras muito finas. Portanto, a rigor, não se têm perdas de resistência somente em longo prazo, mas sim em todas as idades. No

entanto, até a idade dos 28 dias, essa perda é mascarada pelos efeitos benéficos sobre a resistência da temperatura mais alta de cura (NEVILLE, 1997).

5.2 Efeito da temperatura de cura na hidratação e nas propriedades das pastas de cimento Portland.

A cura do concreto em vapor à pressão atmosférica, em temperaturas variando entre 60°C e 100°C, é o método mais empregado em escala comercial para acelerar o endurecimento do concreto, e para elevar-se resistências mecânicas em curto prazo.

Na literatura é unânime à idéia de que o aumento da temperatura acelera as reações iniciais de hidratação do cimento, embora o grau de hidratação e o desenvolvimento de resistência mecânica, em geral, sejam reduzidos nas idades mais avançadas. A temperatura influencia a cinética da hidratação, por provocar mudanças na solubilidade dos componentes do cimento. Essa sensibilidade à temperatura é maior quando a reação é controlada por processo químico, mais precisamente no período entre o início e fim de pega. Isto tem sido comprovado e discutido por vários pesquisadores (CAMARINI, 1995; GARTNER & GAIDIS, 1989; JAWED et al., 1983; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992), que demonstram comparativamente a influência da temperatura em várias etapas de hidratação.

O objetivo principal da cura com vapor é a obtenção de uma resistência inicial suficientemente alta para que o concreto possa ser manuseado o mais cedo possível depois da concretagem; as fôrmas possam ser removidas, o dispositivo de protensão liberado mais cedo, e espaço menor para cura; tudo isso significa vantagem econômica. Para muitas aplicações, a resistência do concreto em longo prazo é menos importante (NEVILLE, 1997).

5.3 Ciclos de Cura

Embora a cura térmica das argamassas e concretos siga as mesmas regras básicas, os procedimentos para esta cura podem ser totalmente diferentes, e dependem, por exemplo, das dimensões das peças e do tipo de aglomerante utilizado. De modo geral, a técnica consiste em submeter às peças a ciclos de cura, que incluem os seguintes períodos:

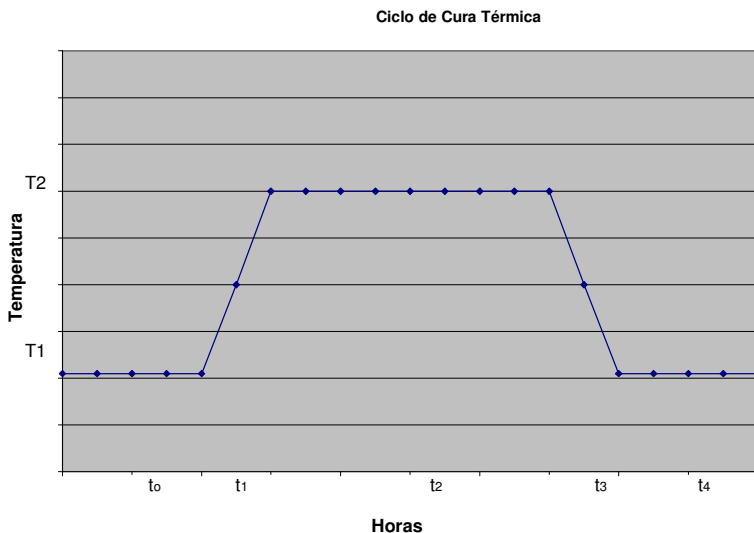


Figura 11 - Ciclo de Cura Térmica

(a) Espera (t_0): período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento;

(b) Aquecimento (t_1): aumento controlado da temperatura de cura, até atingir o valor máximo desejado;

(c) Regime Isotérmico (t_2): manutenção, por algumas horas, da temperatura máxima de cura, até atingir, nesse período, a resistência desejada para transporte ou utilização do produto.

(d) Esfriamento (t_3): a diminuição da temperatura das peças é controlada até atingir-se a temperatura ambiente (CAMARINI, 1995).

(e) Mantém a temperatura ambiente (t_4).

Os ciclos práticos de cura são determinados como um compromisso entre as resistências iniciais e as resistências em longo prazo, mas também são determinados pelo tempo disponível, como, por exemplo, duração das jornadas de trabalho.

A NBR 9062 determina que cada uma das fases do ciclo de cura deverá ser criteriosamente estabelecida através de ensaios experimentais que levem em conta o tipo de aglomerante, tipo de agregados, aditivos, etc.

Considerações econômicas determinam se o ciclo de cura deve se adaptar a um determinado concreto ou, como alternativa, se o concreto deve se adaptar a um ciclo de cura conveniente. Enquanto os detalhes de um ciclo ótimo de cura dependem do tipo de produto de concreto, um ciclo satisfatório típico deve consistir do seguinte:

- Espera de 2 a 5 horas;
- Aquecimento à razão de 22°C/h a 44°C/h;
- Temperatura máxima de 50°C a 82°C;
- Conservação nesta temperatura por algumas horas;
- Período de resfriamento;
- Ciclo total de no máximo 18 horas (NEVILLE, 1997).

A cura a vapor de concretos com cinzas volantes acelera a reação pozolânica com o Ca(OH)_2 , mas somente a temperaturas acima de 88°C (NEVILLE, 1997).

5.3.1 Tempo de Espera

Há a necessidade da conservação do material à temperatura ambiente antes de efetuar a cura térmica. O período de espera deverá ter uma duração tal que permita elevar a temperatura de cura sem prejuízo do desempenho final do material. Há recomendações para que esses variem de 3 a 6 horas (MAMILLAN¹, 1971; KIESLING, 1992), e outras sugerem iniciar o aquecimento após um período de espera correspondente, no mínimo, ao início de pega do concreto pois, neste estágio, ocorre o período de aceleração das reações de hidratação e o processo de cura térmica irá potencializa-las (ACKER², 1986; REINSDORF³, 1964).

Dados levantados da literatura indicam que um período de espera ótimo é necessário antes de se efetuar a cura térmica, que resulta em

¹ MAMILLAN, M. *Recherches experimentales sur l'acceleration du durcissement du beton par le chauffage*. Cement and Concrete Research, v.1, n.2, p.211-23, Mar, 1971. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

² ACKER, P. *Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et applications aux overages d'art*. Annales de l'ITBTP, n.442, Série Béton n.235, p.61-77, fev. 1986. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

³ REINSDORF, S. *Perfectionnements techniques apportés au traitement à la vapeur à basse pression et au chauffage du béton à des températures inférieures à 100°C*. In: Colloque Rilem - Durcissement Accéléré du Béton Manufacturé, p.19-28, Moscou, 1964 apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

maior resistência ao longo do tempo. Com esse período de espera, antes de iniciar-se o aquecimento, contribui-se para aumentar a estabilidade da pasta endurecida durante a elevação da temperatura e, conseqüentemente, melhorar as qualidades do concreto curado à vapor (PAPADAKIS⁴, 1967; LESAGE⁵, 1965; CAMARINI E CINCOTTO, 1996).

Ao escolher as condições de aplicação da cura térmica, é necessário levar em consideração uma série de fatores, que irão resultar na formação de uma estrutura interna do concreto, que esteja em condições ideais para resistir aos processos destrutivos intrínsecos (retrações, expansões, etc.), pois esses processos seguem o endurecimento da pasta de cimento, embora com intensidades variáveis. Portanto, ao escolher as condições iniciais para aplicação da cura térmica, é importante considerar o mecanismo de endurecimento e as propriedades reológicas da pasta de cimento nos concretos, definidas pelas características físicas e pela composição química do aglomerante (CAMARINI E CINCOTTO, 1996).

Com o período de espera a temperatura ambiente, favorece-se a formação de núcleos de cristalização do C-S-H em número e distribuição suficientes que orientarão a evolução uniforme da estrutura interna, garantindo o crescimento da resistência durante a elevação da temperatura e, com isso, resistindo às tensões que surgem provocadas pela variação de volume dos seus componentes e pela transferência de massa (CAMARINI, E CINCOTTO, 1996).

O tempo de início de pega do cimento Portland diminui com o aumento da temperatura. No cimento Portland comum, a 20°C, o tempo de início de pega ocorre em 3:30 h, a 40°C em 1:30 h, e a 80°C, em 30 min. (VENUAT⁶, 1973). Esse fato ilustra que durante o aquecimento a pega ocorre muito rapidamente e se não houver período de espera, prejudica-se a formação de uma estrutura interna adequada para o desenvolvimento da resistência tanto logo após o ciclo de cura como também nas idades avançadas (CAMARINI E CINCOTTO, 1996).

4 PAPADAKIS, M. *L'Estuvage et des produits em bétons. Épernon, centre d'Estudes et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé*, 1967. (Publication Technique n.1) apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

5 LESAGE, M. Étude sur l'étuvage des ciments à addition de laitier. *Revue des Matériaux de Construction "Ciment & Bétons"*, n.594, p.163-72, 1965. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

6 VENUAT, M. *L'accélération de durcissement du béton par la chaleur*. In: *Annales de L'institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, n.302, p.1-15, fev. 1973. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

Como o cimento empregado é muito reativo, a estrutura interna forma-se rapidamente, e o início do aquecimento durante o período de indução não chega a prejudicar o seu desempenho no concreto. É provável que a taxa de 30% de hidratação ocorra muito rapidamente, e ainda mais à medida que o concreto vai se aquecendo com o aumento da temperatura na câmara de cura. Como o mecanismo de reação a partir desse valor é controlado pela difusão de íons através da camada de compostos hidratados, não há proveito em iniciar o aquecimento após longos períodos de espera, conforme indicam os resultados de CAMARINI e CINCOTTO, 1996.

Os ganhos de resistência diminuem após longos períodos de espera indicando que realmente é vantajoso aplicar a cura térmica quando as reações estão controladas pelo mecanismo de dissolução-precipitação, pois, com períodos de espera mais curtos, foi observado um ganho de resistência significativo em relação aos períodos de espera mais prolongados.

Outros pesquisadores como SCRIVENER e WIEKER, 1992, afirmam que o melhor momento para aplicação de ciclos térmicos é durante o estágio de aceleração, após o período de indução (após início de pega do concreto). Observa-se que o aumento da temperatura de cura contribui para que ocorram mais rapidamente os picos característicos nas curvas calorimétricas referente a hidratação do cimento Portland, correspondentes ao 3º estágio (período de aceleração)

É importante ver que os patamares do 4º estágio (período de desaceleração - processo controlado por difusão iônica) também são modificados, indicando que a velocidade das reações das diferentes fases presentes no cimento Portland são afetadas pela temperatura de cura. Significa que os efeitos da cura acelerada, pelo aumento da temperatura, ocorrem também durante as idades posteriores, reduzindo o progresso da hidratação após os ciclos térmicos (SCRIVENER E WIEKER, 1992).

Um outro argumento favorável à necessidade da espera é o de que ela possibilita a reação do C_3A com o gesso. Em temperaturas mais altas a solubilidade do gesso é menor, de modo que parte dele pode não reagir com o C_3A de imediato, mas somente mais tarde, resultando uma reação expansiva do tipo conhecido como ataque por sulfatos, hipótese a ser confirmada (NEVILLE, 1997).

A discussão da cura térmica entra no campo da termodinâmica e baseia-se em conceitos da energia cinética, energia de ativação, energia potencial etc., conceitos todos voltados para sistemas gasosos. Não é o caso do processo de hidratação do cimento Portland (essas são reações

muito complexas), porém parece válida essa aproximação para justificar o aumento da velocidade da reação com o aumento da temperatura.

Em um sistema gasoso, para que a reação ocorra, é necessário que as moléculas colidam com uma energia cinética mínima, denominada energia de ativação. Portanto, o aumento da temperatura aumenta a frequência dessas colisões, favorecendo as reações (CALLISTER, 1994).

De acordo com a literatura (KJELLESEN & DETWILER, 1992), a energia de ativação é geralmente maior quando o mecanismo é controlado quimicamente (superior a 42kJ/mol) comparado ao mecanismo controlado por difusão (cerca de 21kJ/mol). Mais uma vez, no caso dos aglomerantes, justifica-se que o melhor momento para aplicar a cura térmica são os primeiros estágios da hidratação, particularmente logo após o início da pega do concreto, cujo processo é ainda controlado quimicamente.

5.3.2 Período de elevação da Temperatura

Após o período de espera, a temperatura de cura deverá ser elevada até atingir a temperatura final desejada para a cura das peças.

O aquecimento deverá ser gradativo para evitar choques térmicos, evitando a formação de fissuras. Mesmo após o período de espera, a estrutura interna do concreto ainda é pouco resistente, ocorrendo o aparecimento de fenômenos físicos e químicos que poderão afetar o seu desempenho (MAMILLAN⁷, 1971; MIRONOV⁸, 1980; NURSE E WHITAKER⁹, 1964; PAPADAKIS¹⁰, 1967; ACKER¹¹, 1986) dentre

⁷ MAMILLAN, M. *Recherches experimentales sur l'acceleration du durcissement du beton par le chauffage*. Cement and Concrete Research, v.1, n.2, p.211-23, Mar, 1971. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

⁸ MIRONOV, S.A. et al. *Hydration des ciments Portland de laitier à différentes temperatures*. In: International Congress on the Chemistry of Cement, 8th, v.4, Paris, 1980. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

⁹ NURSE, R.W.; WHITAKER, T. *Essais de resistance effectués sur béton traité à la vapeur*. In: Colloque Rilem – Durcissement accéléré du Béton Manufacturé, p.79-89, Moscou, 1964. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹⁰ PAPADAKIS, M. *L'Estuvage et des produits em bétons. Épernon, centre d'Estudes et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé*, 1967. (Publication Technique n.1) apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹¹ ACKER, P. *Effects thermiques dans le bétons en cours de fabrication et applications aux overages d'art*. Annales de l'ITBTP, n.442, Série Béton n.235, p.61-77, fev. 1986. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas

eles:

- Diferenças acentuadas nos coeficientes de dilatação linear dos constituintes das argamassas e concretos;
- Coeficiente de dilatação da água extremamente elevado, principalmente a elevadas temperaturas;
- Expansão do ar incorporado;
- Formação de película impermeável ao redor dos grãos do clínquer, impedindo a hidratação posterior;
- Calor de hidratação do cimento, que atua como uma fonte interna de calor;
- Geometria da peça, principalmente sua espessura;
- Grau de maturidade do material depois do início de pega, para aplicação da cura térmica.

Vários autores sugerem valores máximos a serem adotados para o gradiente de aquecimento: 20°C/hora (MAMILLAN¹², 1971), 20°C a 30°C/hora (PAPADAKIS¹³, 1967) e 33°C/hora (BRADY E HOLUM, 1993), 22-23°C/hora (ACI, 1987), confirmando que a elevação da temperatura deverá ser lenta.

No interior da câmara de cura, deve-se manter a umidade relativa do ar elevada, assegurando não ocorrer à perda de água das peças, cuja superfície deverá estar protegida. MAMILLAN¹², (1971) demonstrou esse fenômeno, observando que a perda de água é mais acentuada para temperaturas mais elevadas, sem proteção da superfície e sem atmosfera saturada de vapor.

As diferenças de temperatura entre o interior e a superfície da peça deverão ser inferiores a 30°C (NURSE E WHITAKER¹⁴, 1964; PAPADAKIS¹³, 1967; MAMILLAN¹², 1971), e, se possível, fazer o seu controle através de termopares. No caso de blocos de concreto, como as paredes têm espessura inferior a 5 cm, não apresentarão diferenças de temperatura superiores a 15° C.

de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹² MAMILLAN, M. *Recherches experimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage*. Cement and Concrete Research, v.1, n.2, p.211-23, Mar, 1971. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹³ PAPADAKIS, M. *L'Estuvage des produits en bétons*. Épernon, centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé, 1967. (Publication Technique n.1) apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹⁴ NURSE, R.W.; WHITAKER, T. *Essais de resistance effectués sur béton traité à la vapeur*. In: Colloque Rilem – Durcissement accéléré du Béton Manufacturé, p.79-89, Moscou, 1964. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

5.3.3 Período Isotérmico

Com o aumento da temperatura da câmara de cura, as reações de hidratação se aceleram e surgem tensões nas peças oriundas de:

- Retrações localizadas devido à dilatação diferenciada entre a superfície e o interior da peça;
- Migração de água nos capilares, produzindo pressões elevadas ao seu redor;
- Crescimento da pressão interna devido à presença de bolhas de ar (PAPADAKIS¹⁵, 1967; CAMARINI, 1995).

Esses fenômenos ocorrem enquanto a temperatura da câmara mantiver o seu valor máximo, sendo a duração desse período um fator muito importante na escolha do ciclo térmico uma vez que exerce influência no desempenho final das peças.

A duração do período isotérmico dependerá da resistência a ser alcançada após o ciclo térmico, da máxima temperatura empregada e do tipo de aglomerante.

Em geral, cimentos muito ativos à temperatura ambiente (cimento de alta resistência inicial) exigem uma curta duração do regime isotérmico. Ao contrário, os aglomerantes menos ativos (cimentos pozolânicos ou de alto-forno) requerem uma duração mais prolongada (PAPADAKIS¹⁵, 1967; CAMARINI, 1995).

Para o cimento Portland comum recomendam-se temperaturas inferiores a 85°C e para os cimentos Portland pozolânicos e de alto-forno, temperaturas inferiores a 95°C (PAPADAKIS¹⁵, 1967; CAMARINI, 1995). ACI recomenda para blocos temperaturas entre 66-74° C.

5.3.4 Período de Esfriamento

Após o regime isotérmico, as peças deverão ser resfriadas até atingirem a temperatura ambiente. O resfriamento deverá ser gradativo, de modo a evitar retrações térmicas, que podem aparecer na superfície da peça, ocorrendo uma fissuração prematura.

O esfriamento deve ser feito de modo a não provocar gradientes térmicos superfície-interior da peça, que pode ser no máximo de 30°C,

¹⁵ PAPADAKIS, M. *L'Estuvage et des produits en bétons. Épernon, centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé*, 1967. (Publication Technique n.1) apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

sem afetar o seu desempenho (NURSE E WHITAKER¹⁶, 1964; PAPADAKIS¹⁷, 1967; MAMILLAN¹⁸, 1971).

O ACI recomenda um esfriamento da ordem de 39°C/hora.

Para garantir a homogeneidade do ciclo térmico aquecimento-esfriamento, é recomendável seguir, para o esfriamento, o mesmo gradiente utilizado no aquecimento.

Nos regimes isotérmicos mais curtos, nos quais a temperatura de cura é baixa, o esfriamento deve ser lento, uma vez que a resistência mecânica atingida é mais baixa, evitando assim o choque térmico e o aparecimento das fissuras. O mesmo cuidado deve ser observado para ciclos de cura com temperaturas elevadas, pois gradientes de aquecimento e esfriamento elevados também conduzem à formação de fissuras (CAMARINI, 1995).

Os ciclos de cura deverão ser definidos experimentalmente com os materiais a serem empregados e sempre mantendo a atmosfera da câmara saturada de umidade, em todas as etapas da cura térmica, evitando a dessecação das peças.

5.4 Câmara de cura térmica

A câmara de cura térmica deve ser tal que permita a manutenção da temperatura de cura desejada e, o ambiente, saturado de vapor. Algumas recomendações devem ser seguidas:

- o controle de temperatura do vapor deverá ser feito em vários pontos para garantir que ocorra a mesma temperatura de cura em todos os pontos do seu interior;
- a câmara deverá ter dispositivo que permita o controle dos gradientes de aquecimento e esfriamento escolhidos para o desenvolvimento dos ciclos de cura;
- deverá ser mantida também a temperatura máxima de cura

¹⁶ NURSE, R.W.; WHITAKER, T. *Essais de resistance effectués sur béton traité a la vapeur*. In: Colloque Rilem – Durcissement accéléré du Béton Manufacturé, p.79-89, Moscou, 1964. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹⁷ PAPADAKIS, M. *L'Estuvage et des produits en bétons. Épernon, centre d'Estudes et de Recherches de l'Industrie du Béton Manufacturé*, 1967. (Publication Technique n.1) apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

¹⁸ MAMILLAN, M. *Recherches experimentales sur l'acceleration du durcissement du beton par le chauffage*. Cement and Concrete Research, v.1, n.2, p.211-23, Mar, 1971. apud CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado - EPUSP - PCC, 252p. São Paulo, 1995.

desejada;

- o vapor existente não deverá escapar totalmente, para evitar variações de temperatura no seu interior;
- os níveis de água deverão ser facilmente restabelecidos após a realização de cada ciclo de cura;
- a câmara de cura deverá ter uma chave geral;

As figuras 12 e 13 nos mostram câmaras de cura utilizadas em fábricas de blocos pré-moldados.



Figura 12 - Câmaras de cura utilizadas em uma fábrica de blocos.
Observar fechamento com lona para início do processo de cura térmica.



Figura 13 – Distribuição dos blocos dentro das câmaras de cura.

Para uma câmara de cura que simule as condições de cura utilizada em fábricas de blocos, em laboratório, recomenda-se além de todos os itens acima:

- utilizar materiais de fácil aquisição;
- deve-se contar com equipamentos de segurança para evitar queimaduras ao lidar com os materiais aquecidos.
- garantir que a atmosfera dentro da câmara se mantenha saturada de vapor durante todo o ciclo térmico.

Os detalhes sobre a instalação e funcionamento da câmara de cura a ser utilizada nesta pesquisa estão apresentados no capítulo 7.

6. EFEITOS DA CURA TÉRMICA NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

6.1 Produtos de hidratação do concreto submetido a cura térmica

O comportamento das principais fases presentes no cimento quando hidratadas em diferentes temperaturas confirmam reatividades diferentes, conforme pode ser visto na Tabela 6 (ASAGA et al., 1992).

Observa-se que a quantidade de Alita (C₃S) que reage nas idades avançadas (a partir de 28 dias) não é afetada pela temperatura de cura. Aos 28 dias, as taxas de hidratação são praticamente iguais (cerca de 80%) independentemente da temperatura de cura. No caso da Belita (C₂S), as temperaturas mais elevadas aceleram o processo, também nas idades avançadas.

Tabela 6 - Variação da taxa de hidratação (%) das fases presentes no cimento Portland com a idade (ASAGA et al., 1992)

	Alita		Belita		Aluminato		Ferrita	
	28		28		28		28	
	1 dia	dias	1 dia	dias	1 dia	dias	1 dia	dias
20°C	50	78	4	20	48	83	9	38
50°C	65	80	12	48	81	85	38	39
80°C	75	82	35	68	85	91	41	51

A hidratação da fase Aluminato (C₃A) à temperatura acima de 50°C é bastante afetada nos estágios iniciais, de modo que com 1 dia é possível hidratar mais de 80%. Na fase Ferrita (C₄AF), observa-se que a temperatura interfere acentuadamente na velocidade de hidratação inicial, mas quando atinge 50% de produto hidratado o processo parece independer da temperatura de cura (MELO, 2000).

Os produtos hidratados com o uso de cimento Portland comum são os mesmos, tanto na cura térmica quanto na cura normal, formando C-S-H, CH, Aft e AFm (DE MELO, 2000).

As reações de hidratação têm sua velocidade controlada pela

concentração da quantidade relativa de compostos anidros presentes e pela reatividade dos compostos do cimento, isto é, pela capacidade de reagir com a água, formando compostos hidratados. Depende também da finura, da composição do cimento e da relação água/cimento. O aumento da temperatura de cura é outra forma de aumentar a velocidade de hidratação, favorecendo as condições de dissolução/precipitação e difusão, para que os compostos reajam entre si.

Os compostos hidratados formados nas amostras com cimento Portland comum, submetidas à cura térmica com $T_{\text{máx}}=50^{\circ}\text{C}$, não diferem daqueles formados sob cura normal ($T = 23^{\circ}\text{C}$). Sabe-se que nesse cimento a quantidade de CH aumenta ao longo do tempo, traduzindo o progresso da hidratação. Quando se utiliza cura térmica, essa quantidade de CH é aumentada, pois o aumento da temperatura favorece a maior formação de CH (ASAGA et al., 1992; CAO E DETWILER, 1995; CAMARINI, 1995; SCRIVENER E WIEKER, 1992; TAYLOR, 1992).

Com respeito aos teores das fases AFt e AFm, estes parecem diminuir com o aumento da temperatura. A AFt não é encontrada acima de 60°C ou 70°C e pouco ou nenhum AFm (ou outras fases de AFm) são encontrados quando a cura térmica é realizada em temperaturas de 90°C ou 100°C .

Em temperaturas elevadas, a AFt é instável e o sulfato encontra-se combinado em outras fases (AFm ou C-S-H) ou pode permanecer livre na fase líquida (SIEDEL, et al., 1993). Após o tratamento térmico, a AFt decomposta pode formar-se novamente nas idades mais avançadas, denominando-se AFt secundária (reação expansiva). Admite-se que a origem do sulfato requerido para formação da AFt secundária possa vir da fase AFm, ou mesmo venha do sulfato que está misturado com os hidratos do C_3S . O período de tempo para que AFt volte a se formar é bastante variável, podendo ocorrer em dias ou anos, após o tratamento térmico. Estudos específicos têm divulgado que a maior expansão, na condição de elevada umidade, pode desenvolver-se em cerca de 20 dias, permanecendo constante a partir dessa idade (DE MELO, 2000).

A presença de umidade é condição necessária para que a AFt secundária ocorra. Em geral, esta se forma nas microfissuras, nos vazios e na interface matriz agregado (zona de transição), resultando na expansão característica da formação da AFt, caso não haja espaço suficiente para acomodar seus cristais (SIEDEL, et al., 1993). Estes fatos podem explicar o baixo desempenho em cura térmica de cimentos ricos em C_3A .

Para o efeito da temperatura de cura na hidratação são destacados dois aspectos:

1 – o seu efeito na taxa de hidratação é muito mais acentuado nas primeiras idades do que em idades avançadas;

2- o grau de hidratação será mais elevado nas temperaturas mais baixas (KJELLESEN E DETWILER, 1992).

Isto é perfeitamente coerente com a tese de que uma hidratação inicial rápida sob temperaturas elevadas retarda a hidratação posterior e resulta numa distribuição não uniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta.

Portanto, a comparação entre regimes de cura deve considerar que a velocidade de deposição dos produtos hidratados no sistema de pasta de cimento Portland depende da reatividade do próprio cimento e do meio ambiente onde as reações ocorrem. Quando o cimento é hidratado à temperatura ambiente (20°C), há um tempo suficiente para os compostos hidratados se espalharem e precipitarem de modo relativamente uniforme, pelos espaços existentes entre os grãos de cimento (região "outer"). Porém, se a hidratação for acelerada (ex.: cura térmica) os produtos formados, inicialmente mais rápidos, dificultarão a difusão posterior de íons e a microestrutura resultante é caracterizada por elevada concentração de compostos hidratados ao redor dos grãos de cimento e conseqüente formação de grandes poros na região "outer" (KJELLESEN et al., 1990; PATEL et al., 1995; PATEL et al., 1996; SCRIVENER, 1992; SCRIVENER E WIEKER, 1992).

Essa distribuição não uniforme dos produtos de hidratação afeta a resistência mecânica, porque a relação gel/espaco nos interstícios é menor do que seria no caso de uma hidratação lenta (distribuição uniforme). As áreas menos resistentes localizadas acabam reduzindo a resistência da pasta como um todo (DE MELO, 2000).

Outro efeito da elevação da temperatura nos produtos de hidratação é o aumento no tamanho dos poros, principalmente na zona de interface pasta-agregado. Há evidências de que a cura térmica só reduz o volume de poros menores do que 25nm a 35nm (KJELLESEN et al., 1990). Portanto, neste caso, é de se esperar uma redução também no teor de água interlamelar do C-S-H.

Em temperaturas de cura elevadas, o C-S-H formado nos produtos "inner" aparentemente tornam-se mais densos (menor porosidade nos microporos) e os produtos "outer" contêm poros maiores. A influência da temperatura de cura na distribuição do C-S-H é maior para relações a/ag maiores, especialmente na presença de sílica ativa, pois os produtos "outer" podem tornar-se menos permeáveis –

baixa porosidade (KJELSEN et al., 1996). A relação Ca/Si existente na composição do C-S-H também é alterada em função da temperatura de cura.

Como já foi citado, ao contrário do C-S-H, o cristal de CH é o único composto da pasta que ocorre numa forma relativamente pura, com pequena quantidade de íons incorporados à sua estrutura. Nas primeiras idades, o CH tende a formar cristais grandes, semelhante a placas hexagonais, facilmente encontradas em vazios grandes da pasta de cimento endurecida. Em idade mais avançadas, a superfície de fratura geralmente apresenta pilhas de placas de CH geometricamente bem definidas. A morfologia e as dimensões desses cristais (CH) variam numa mesma pasta, em função da relação a/c, do tipo e da concentração de íons presentes e das condições de cura. Devido à sua dimensão avantajada e, portanto, à baixa área específica, são fracas as forças de ligação entre cristais de CH ou entre ele e outros sólidos da pasta de cimento (BAUER, L.A.F.; OLIVAN, L.I., 1976).

Na medida em que a temperatura de cura aumenta, a fase CH torna-se mais entremeada com o C-S-H. Esse fato pode ser explicado pela diminuição da solubilidade do CH cuja nucleação é favorecida pela temperatura (SCRIVENER & WIEKER, 1992). Nota-se também que sua morfologia varia com a temperatura de cura e que a quantidade aumenta com o aumento dessa temperatura.

A cura a vapor em concretos com adição de cinza volante acelera a reação pozolânica com o Ca(OH)_2 , mas somente a temperaturas acima de 88°C.

6.2 Formação de etringita secundária

A formação da etringita secundária (AFtS) tem sido apontada como responsável pelos danos nos concreto, curados a elevadas temperaturas, mas a evidência disso ainda não está clara. A formação AFtS refere-se ao reaparecimento da AFt em um material que foi submetido a altas temperaturas, suficientes para destruir alguns ou todos os cristais de AFt, presentes inicialmente (AFt primária).

De acordo com vários autores (CAMARINI, 1995; KUZEL, 1996; SCRIVENER E LEWIS, 1997; SIEDEL et al., 1993), na maioria das pastas de cimento Portland curadas em temperaturas mais elevadas (entre 60°C e 80°C), seguida de cura úmida, a AFt decomposta durante o ciclo térmico volta a formar-se numa idade mais avançada. Nessa idade, é conhecida como AFt secundária (AFtS) e tende a ter agulhas mais

curtas e grossas com seção transversal hexagonal. O fenômeno da AFt secundária em concretos submetidos à cura térmica é bastante discutido na literatura, havendo controvérsia sobre seus efeitos expansivos e suas consequências na perda potencial de resistência do concreto em longas idades após o tratamento térmico (DIAMOND E ONG, 1993; SCRIVENER E LEWIS, 1997; TAYLOR, 1993).

A AFt (primária) tende a desaparecer após algumas horas a 70°C ou 80°C e a fase AFm também desaparecerá, só que a uma temperatura maior (90°C). Neste processo, alguns dos sulfatos entram na solução do poro, mas muitos deles, e praticamente todo o aluminato, são incorporados pelo gel de C-S-H, de uma maneira semelhante a quando ocorre a baixa temperatura. A temperatura 70°C não é um limite de estabilidade, para a qual (ou acima da qual) toda a AFt em qualquer pasta de cimento é decomposta. Na verdade, este é o valor aproximado em que danos de expansão associados com a formação da AFtS não têm ocorrido.

A teoria da expansão da pasta é similar àquela que ocorre em ataque externo por sulfato e é provavelmente mais correta do que aquela que requer para a expansão a cristalização da AFt na interface dos agregados (TAYLOR, 1993).

A presença de microfissuras no sistema é uma condição necessária para ocorrer a expansão e assume-se que a frente da reação avança para o interior do material, como ocorre no ataque externo por sulfato. Tais microfissuras podem ser advindas da reação alcali-agregado (RAA) ou por outros mecanismos. Inicialmente, a AFt é formada como microcristais dispersos no gel de C-S-H. Estes, por sua vez, tendem a recrystalizar-se nos grãos de HADLEY e em outras cavidades existentes. A pasta expande-se, não devido a esta recrystalização, mas devido ao processo, ocorrendo em uma escala menor. Esta expansão prolonga e alarga as microfissuras (aumenta as microfissuras), especialmente ao redor dos grãos de agregados. A AFt recrystaliza-se nesses locais, talvez tão rapidamente quanto o espaço torna-se disponível. Se a ligação entre pasta-agregado é suficientemente forte, a pasta não pode expandir-se, porque a expansão é restringida pelo agregado.

A AFt tem sido freqüentemente considerada um produto indesejável no concreto. Sua formação pode causar danos pela expansão e possivelmente pela destruição da coesão da pasta. Ela é freqüentemente vista em microfissuras ou cavidades em concretos deteriorados. Isto provavelmente apenas reflete o fato de que o concreto deteriorado é responsável por conter microfissuras, que podem surgir de

várias causas, como por exemplo: reação álcali-agregado, danos por ação do gelo-degelo, solicitação mecânica etc. Ignorando a causa dessas microfissuras, qualquer AFt presente na pasta se recristalizará nesses espaços. O fato é que não existe base lógica para assegurar que a recristalização da AFt tenha produzido a microfissura. Sua ocorrência nesses espaços pode ser, e é provavelmente, um efeito ou um sintoma, não a causa (TAYLOR, 1993).

Na aplicação de cura térmica, a preocupação com os efeitos da reação álcali-agregado é maior, tendo em vista que a elevação da temperatura acelera também essa reação. É importante minimizar as consequências da presença de agregados altamente reativos (nem sempre é possível evitá-los), com a limitação do teor de álcalis do cimento Portland. Deve-se preferir cimentos com baixo potencial a formação da AFt (C_3A .7% e SO_3 .2,8%) em qualquer hipótese.

6.3 Método da Maturidade

O fato de que a resistência do concreto aumenta com o progresso da hidratação do cimento, combinado com o fato de que a velocidade de hidratação aumenta com o aumento da temperatura, conduz à proposição de que a resistência pode ser expressa como uma função da combinação tempo-temperatura (NEVILLE, 1997).

O Método da Maturidade teve sua origem na Inglaterra na década de 50, sendo introduzindo por SAUL. Para estimar as resistências do concreto após um período de cura a alta temperatura, SAUL relacionou o conceito de maturidade com a resistência à compressão, denominado por ele de lei do ganho de resistência com maturidade. Para SAUL, uma mesma mistura de concreto a um mesmo grau de maturidade, medido como função de temperatura e tempo, tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade (SCOARIS, et al; 2005).

Com o passar dos anos, outros pesquisadores aprimoraram o método inicialmente proposto por Saul, entre eles Nurse, que sugeriu que o simples produto do tempo x temperatura seria capaz de representar os efeitos de cura a vapor no ganho de resistência a compressão.

A função de Nurse-Saul é baseada em observações empíricas e leva em consideração a influência da temperatura no desenvolvimento da resistência a partir de uma função matemática simples.

Entretanto, quando amostras de diferentes concretos são

colocadas sob temperaturas distintas nas primeiras idades, a função de Nurse-Saul não representará necessariamente de forma correta o efeito da temperatura de cura no ganho de resistência. Isto se deve ao fato de que a função de Nurse-Saul não possui relação direta com os processos reais físicos e químicos da hidratação do cimento (SCOARIS, et al; 2005).

Rastrup, em 1954 introduziu o termo de idade equivalente (t_e). Em seus estudos, admite que o concreto atinja o mesmo grau de maturidade que atingiria caso tivesse sido mantido continuamente a uma temperatura de referência até a idade (t_e). Usualmente utiliza-se a temperatura de 20°C como temperatura de referência. Neste caso, calcula-se o tempo necessário para atingir o mesmo grau de maturidade que seria atingido caso a temperatura durante a cura do concreto permanecesse constante a 20°C.

Arrhenius introduziu o conceito de energia de ativação – E – em equações químicas. Segundo este conceito, a reação química só se processa quando as moléculas possuírem energia cinética mínima para transformarem-se de reagentes em produtos. No caso do cimento, é mais apropriado o termo Energia Aparente de Ativação (E_a), uma vez que as diversas reações químicas envolvidas na hidratação ocorrem simultaneamente, conduzindo a um “valor médio” para a energia de ativação.

Existem vários métodos para obtenção da energia aparente de ativação do processo de hidratação do cimento, mas dependendo do processo empregado, os valores obtidos podem ser diferentes (PINTO, 2004).

Entre as funções mais usuais para o estudo da maturidade destaca-se a função desenvolvida por Freiesleben-Hansen e Pedersen, baseada no modelo de Arrhenius para dependência de uma reação química com a temperatura. A equação de Freiesleben-Hansen e Pedersen (função denotada de FHP) é apresentada através da Eq. 2. Ela necessita de um parâmetro relativo à sensibilidade térmica da reação chamado de energia aparente de ativação - E_a .

$$t_e = \sum_0^t \left[\exp \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \Delta t$$

Equação 2 - Método da Maturidade - Função de FREIESLEBEN-HANSEN e PEDERSEN (FHP)

Onde:

t_e – idade equivalente na temperatura de referência T_r , (h);

E_a – energia aparente de ativação, em J/mol;

R – Constante universal do gás, (8.1314 J/K mol);

T – temperatura absoluta do concreto durante o intervalo de tempo t , em K;

T_r – temperatura de referência, em K;

Δt - Intervalo de tempo, (h).

A função de FHP, embora seja de maior complexidade, é a que melhor representa o real efeito da temperatura na velocidade das reações de hidratação do cimento. Entretanto, para a sua utilização, é necessário o conhecimento prévio da energia aparente de ativação das reações de hidratação do cimento (SCOARIS, et al; 2005).

Alguns pesquisadores têm relatado boa correlação entre a maturidade e a resistência à compressão do concreto, enquanto outros têm questionado a validade do conceito da maturidade. Por exemplo, enfatiza-se que esse conceito não considera a influência da umidade de cura, do calor de hidratação, da composição variável do cimento, e da temperatura de cura durante as primeiras idades que, contrariamente às considerações do conceito de maturidade, parecem exercer um efeito importante sobre a resistência com os tempos iniciais (NEVILLE, 1997).

Em particular, os efeitos de um período de exposição a temperaturas mais altas não são iguais se isso ocorre imediatamente após a moldagem ou mais tarde, na vida do concreto. Especificamente, temperaturas iniciais mais altas resultam resistências menores para uma mesma maturidade total do que quando o aquecimento é retardado por, pelo menos, uma semana, ou quando não é aplicado (NEVILLE, 1997).

6.4 Considerações Finais:

Considerando-se que:

- Altas temperaturas de cura traduzem-se em resistências menores em longo prazo;
- Altas temperaturas de cura podem formar compostos hidratados com menor resistência ou com propriedades expansivas na pasta endurecida;
- Altas temperaturas de cura formam pastas endurecidas com

maior quantidade de poros grandes, diminuindo a durabilidade e resistência das peças;

- Os compostos hidratados formados nas amostras com cimento Portland comum, submetidas à cura térmica com $T_{\text{máx}}=50^{\circ}\text{C}$, não diferem daqueles formados sob cura normal ($T = 23^{\circ}\text{C}$).

Espera-se, baseado no conceito da maturidade (considerando que temperaturas mais baixas, aplicadas ao concreto logo após o tempo de espera, por períodos mais prolongados, poderão gerar concretos com a mesma resistência que concretos com temperaturas mais elevadas por menores períodos), ser possível acelerar o ganho das resistência iniciais evitando as várias conseqüências negativas que trazem as altas temperaturas de cura à pasta endurecida.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

É interessante estabelecer simulações de modo a aproximar o estudo experimental da prática das indústrias (casos reais). Por exemplo, os ciclos térmicos de curta duração, ajustados para resistências a compressão imediata (após os ciclos), simulam casos em que há desmoldagens rápidas dos elementos pré-moldados leves (espessura de 40 mm) e uma continuidade em processo de cura normal (câmara úmida $T=23^{\circ}\text{C}$, h. 95 %), até sua idade de aplicação (DE MELO E LIBORIO, 1994a; DE MELO, 1996; LIBORIO E DE MELO, 1995b).

A produção de blocos de concreto depende de inúmeras variáveis que devem ser avaliadas de forma conjunta para que o estudo em laboratório apresente resultados confiáveis.

O método de dosagem utilizado neste trabalho segue o método proposto por FRASSON, 2000. A filosofia deste método leva em conta uma gama de variáveis que, considera-se aqui, ser de fundamental importância para o alcance de resistências e características especificadas para blocos. Dentre estas características, estão a avaliação da resistência à compressão, coesão e textura das misturas. Estas propriedades são influenciadas por parâmetros como a granulometria e proporcionamento dos agregados, tipo e teor de aglomerante, capacidade de compactação dos equipamentos, massas específicas dos concretos e umidade das misturas.

Utilizar uma fábrica de blocos para moldagem e cura dos blocos de concreto para o estudo sobre a influência da cura térmica, encarece e dificulta todo o estudo.

Para que se pudesse estudar a influência da cura térmica aplicada aos blocos, buscou-se simular em laboratório uma câmara com condições de umidade e temperatura semelhantes aos de uma fábrica de blocos, sendo necessário para este estudo corpos-de-prova de tamanho reduzido.

Padronizou-se, então, a moldagem de misturas de concreto “secos” em corpos-de-prova cilíndricos 5x10cm. A escolha deste tipo de corpo-de-prova (CP) deve-se ao fato que ele é fácil de manusear e com pequenos consumos de material é possível produzir uma quantidade grande de CPs. Com a moldagem destes CPs foi possível obter valores de resistência à compressão, simulando peças com características semelhantes às dos blocos produzidos nas fábricas, podendo com eles estudar-se as influências das condições de cura.

A proporção entre as resistências dos CPs 5x10 e dos blocos

moldados em fábrica, segundo o estudo realizado por FRASSON, 2000, para todos os traços e geometrias estudadas giraram em torno de 80%. Isto quer dizer que ao ensaiar um CP cilíndrico 5x10, está se atingindo por volta de 80% da resistência que um bloco com o mesmo traço e mesma massa específica, na área líquida, poderia atingir.

7.1 Método de dosagem proposto por Frasson (2000)

Frasson (2000) propõe uma metodologia de dosagem para blocos de concreto com base na moldagem, em laboratório, de corpos-de-prova cilíndricos 5 x 10 cm, buscando-se alcançar a mesma massa específica (volume de vazios) dos blocos moldados no próprio equipamento de vibro-compressão. Segundo o referido autor, através destes corpos-de-prova, consegue-se prever, com boa segurança, características importantes como coesão, textura superficial e, até mesmo, resistência à compressão.

A seguir, serão descritos os procedimentos básicos para aplicação da referida metodologia.

7.1.1 Proporcionamento entre os agregados:

O agregado miúdo a ser empregado ou o proporcionamento entre agregados miúdos deve apresentar um módulo de finura entre 2,20 a 2,80 e uma percentagem passante na peneira 0,3 mm em torno de 15 a 30%, para obter-se uma coesão adequada à produção.

As proporções entre agregados graúdo e miúdo são definidas por tentativas, mediante a moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm, empregando-se um traço médio (1:9), avaliando-se as características superficiais dos corpos-de-prova e determinando-se seus respectivos valores de coesão, segundo o ensaio proposto por FRASSON (2000). Geralmente, as proporções entre agregados encontram-se por volta de 20 a 40% de agregado graúdo para 80 a 60% de agregado miúdo, dependendo dos materiais empregados, das características superficiais exigidas pelo mercado e do tipo de equipamento de vibro-compressão empregado. O proporcionamento mais adequado é aquele que satisfaz o requisito de textura e coesão.

Para definir as massas específicas a serem adotadas é necessário que se utilize uma faixa de valores possíveis de serem alcançadas em uma fábrica de blocos.

No estudo apresentado por FRASSON (2000), as massas específicas encontradas nos blocos foram em torno de 2,03 a 2,19 kg/dm³.

O teor de umidade para os concretos "secos", utilizados na fabricação de blocos, estava entre 5,5 a 8% em relação a massa total, incluindo o cimento. A orientação é para que se atinja sempre a máxima umidade que permita ao equipamento moldar os artefatos sem provocar danos durante a desmoldagem.

Para verificar a influência do consumo de cimento, sugere-se a utilização de traços 1:7, 1:9 e 1:11, traços estes utilizados em blocos estruturais onde esperam-se resistências em torno de 4,5 a 12 MPa (em área bruta), dependendo também do equipamento utilizado.

7.2 Agregados e aglomerante utilizados na pesquisa

Para este estudo foram utilizados, areia fina, areia média e pedrisco com granulometria e traços apresentados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 e Figura 14.

Tabela 7 - Composição granulométrica da areia fina

Peneiras (mm)	Massa (g)	%	% Acum.
12,5	0,0	0,00%	0,00%
9,5	0,0	0,00%	0,00%
6,3	0,0	0,00%	0,00%
4,8	0,0	0,00%	0,00%
2,4	0,0	0,00%	0,00%
1,2	4,5	0,40%	0,40%
0,6	22,5	2,02%	2,43%
0,3	75,5	6,79%	9,22%
0,15	653,6	58,80%	68,02%
0,075	353,5	31,80%	99,82%
Fundo	2,0	0,18%	100,00%
Σ	1111,6	Σ	

Dimensão Máxima Característica = 0,6 mm

Dimensão Mínima Característica = 0,075 mm

Módulo de Finura = 0,801

Tabela 8 - Composição granulométrica da areia média

Peneiras (mm)	Massa (g)	%	% Acum.
12,5	0,0	0,00%	0,00%
9,5	0,0	0,00%	0,00%
6,3	3,5	0,30%	0,30%
4,8	8,2	0,70%	1,00%
2,4	72,5	6,18%	7,18%
1,2	322,5	27,49%	34,67%
0,6	286,5	24,42%	59,10%
0,3	178,7	15,23%	74,33%
0,15	217,8	18,57%	92,90%
0,075	78,7	6,71%	99,61%
Fundo	4,6	0,39%	100,00%
Σ	1173,0	Σ	

Dimensão Máxima Característica = 4,8 mm

Dimensão Mínima Característica = 0,075 mm

Módulo de Finura = 2,692

Tabela 9 - Composição granulométrica do pedrisco

Peneiras(mm)	Massa (g)	%	% Acum.
12,5	0,0	0,00%	0%
9,5	1,0	0,09%	0%
6,3	506,3	45,67%	46%
4,8	454,0	40,96%	87%
2,4	143,7	12,96%	100%
1,2	0,0	0,00%	100%
0,6	0,0	0,00%	100%
0,3	1,9	0,17%	100%
0,15	0,4	0,04%	100%
0,075	0,7	0,06%	100%
Fundo	0,5	0,05%	100%
Σ	1108,5	Σ	

Dimensão Máxima Característica = 9,5 mm

Dimensão Mínima Característica = 2,4mm

Módulo de Finura = 5,856

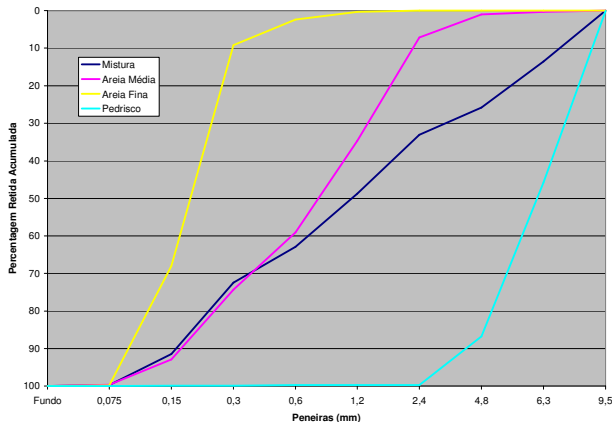


Figura 14 - Gráfico da curva granulométrica dos agregados utilizados

Tabela 10 - Massa Específica e Material Pulverulento dos agregados utilizados na moldagem dos CPs 5 x 10

	Massa Específica Kg/dm ³	Material Pulverulento (%)
Areia Fina	2,651	0,52
Areia Média	2,446	1,07
Pedrisco	2,625	0,74

Foi utilizado neste estudo cimento CP V – ARI RS, com massa específica de 2,96 g/cm³ e com caracterização fornecida pelo fabricante apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado na pesquisa.

	<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Ensaios Físicos</i>	Material Retido #200 (mesh)	%	0,17	0,06	0,1	0,3
	Material Retido #325 (mesh)	%	1,94	0,28	1,6	2,5
	Blaine	cm ² /g	4978	79,5	4820	5130
	Água de Consistência	%	30,14	0,30	29,6	30,6
	Início de Pega	Minutos	193	7	180	210
	Fim de Pega	Minutos	256	9	240	275
	Expansibilidade a Quente	mm	0,30	0,36	0	1,5
	Resistência R1	Mpa	21,24	0,95	21,24	23,30
	Resistência R3	MPa	32,40	0,86	30,80	33,90
	Resistência R7	MPa	38,07	0,74	36,30	39,60
	Resistência R28	MPa	47,70	0,75	46,30	48,90
Obs: Resistências R28 referem-se ao mês de junho de 2007						
<i>Ensaios Químicos</i>	Perda ao Fogo	%	2,72	0,07	2,58	2,87
	SiO ₂	%	23,16	0,80	21,86	24,56
	Al ₂ O ₃	%	6,56	0,31	5,99	7,07
	Fe ₂ O ₃	%	3,40	0,09	3,20	3,53
	CaO	%	52,83	0,79	51,90	54,23
	MgO	%	5,38	0,29	4,92	5,77
	K ₂ O	%	1,04	0,04	0,96	1,10
	Na ₂ O	%	0,05	0,00	0,05	0,05
	SO ₃	%	3,58	0,08	3,47	3,78
	Resíduo Insolúvel	%	13,40	0,93	10,97	14,95
	CO ₂	%	1,95	0,07	1,83	2,09

7.3 Equipamentos e procedimentos para a confecção dos CPs 5x10

O equipamento utilizado na confecção dos CPs 5x10 foi um molde tripartido 50x130mm (Figura 15). Como os concretos “secos” possuem a propriedade de desforma logo após sua moldagem, devido a seu abatimento ser zero, o molde tripartido facilita esta operação. A altura do molde possui 130 mm para poder comportar o concreto seco, que no estado solto, possui um volume bem maior do que a altura final do CP (100mm), facilitando a colocação de material para sua posterior compactação.

O valor da massa dos corpos-de-prova, segundo o método proposto, é definido anteriormente para que, após a compactação, se consiga um concreto com uma dada massa específica. Esta massa é pesada em três partes iguais, para formarem as camadas do CP. Para cada camada colocada dentro do molde, foram aplicados vinte golpes utilizando-se o mesmo soquete de CPs de argamassa, especificado na NBR 7215/1996. A força aplicada nos golpes foi distribuída igualmente em cada camada de maneira tal para que o CP possuísse, ao final da compactação, uma altura em torno de 103 mm. Isto porque o acabamento e a compactação final, que deixam o CP com 100 mm de altura, são dados por um tarugo de nylon comprimido por golpes de um martelo de borracha. Após a finalização da moldagem, desparafusa-se o anel que envolve o módulo tripartido e desforma-se o CP.



Figura 15 - Molde tripartido 5x13 utilizado para moldar os corpos-de-prova cilíndricos 5x10

7.4 Plano de moldagem e traços empregados na moldagem dos corpos de Prova 5 x 10 cm

A seqüência dos ensaios pode ser visualizada na figura 16.

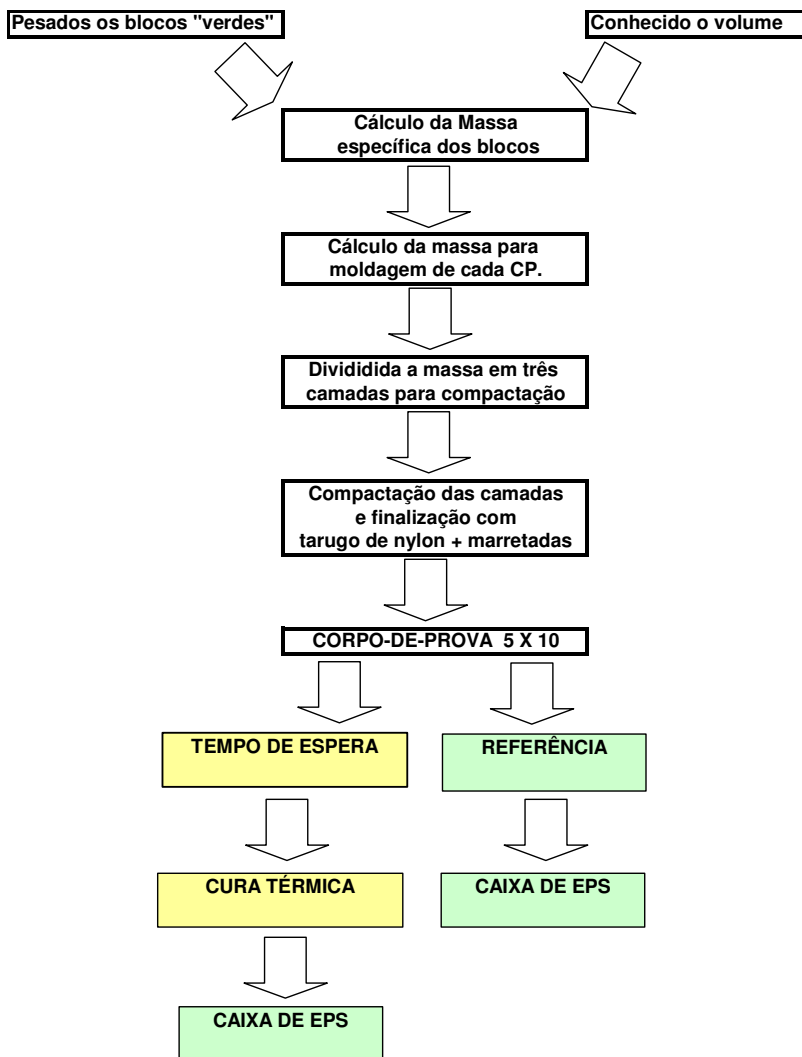


Figura 16 - Fluxograma seqüência dos ensaios

Para que os CPs a serem moldados tivessem a mesma massa específica dos blocos moldados nas fábricas, fez-se um estudo de pesagem de blocos recém moldados (“verdes”), em uma fábrica de blocos, para a partir deste valor calcular a massa específica dos CPs.

Foi necessário também encontrar o volume médio dos blocos (14x19x39 – L x H x C). O ensaio para obtenção de volume consiste em manter os artefatos submersos em água por 24 horas antes de imergi-los em uma caixa (neste caso metálica) preenchida com água com um volume perfeitamente conhecido e com um orifício lateral que serve como extravasor. Isto evita a perda de água da caixa para os poros do bloco e dá com maior precisão o volume real do artefato testado (volume de forma). A submersão do bloco na caixa provoca a saída de água pelo orifício. O líquido que vaza da caixa é despejado em um recipiente e, depois que todo ele tiver vazado, este pode ser pesado para obtenção de seu volume. Desta forma simples, pode-se obter o volume dos blocos estudados possibilitando o cálculo da sua massa específica.

Conhecido o valor da massa específica a ser alcançada nos CPs a serem moldados, obteve-se o valor da massa a ser pesada para cada camada dos CPs.

Os traços utilizados neste estudo são mostrados na Tabela 12:

Tabela 12 - Proporcionamento dos materiais

Traço	Proporcionamento dos materiais em massa									
	Unitário					Total (g)				
	Cimento	Areia média	Areia fina	Pedrisco	Aditivo	Cimento	Areia média	Areia fina	Pedrisco	Aditivo
1:11	1	6,28	1,58	3,14	0,002	233,67	1467,45	369,2	733,72	0,467
1:9	1	5,09	1,28	2,62	0,002	311,56	1585,84	397,86	815,35	0,623
1:7	1	3,92	0,98	2,10	0,002	400,63	1570,47	392,62	838,92	0,801

O grau de umidade utilizado foi de 6 % e massa específica de 2,10 g/dm³.

Para cada traço, foram moldados 84 corpos-de-prova, sendo que 36 aguardaram o período de 1 hora e os outros 36 aguardaram 2 horas para iniciarem os procedimentos de cura térmica. Conforme demonstra a Tabela 13, foram moldados também, 12 CPs para cada traço, que não receberam tratamento térmico, denominados *Referência*.

Tabela 13 - Número de CPs para cada ciclo de cura

Traços	Referê ncia	Espera = 1 hora			Espera = 2 horas			Total
		Temperatura Cura			Temperatura Cura			
	23 °C	40 °C	60 °C	80 °C	40 °C	60 °C	80 °C	
1:7	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	84 cp
1:9	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	84 cp
1:11	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	12 cp	84 cp

Para o traço 1:9 foram moldados 24 corpos-de-prova, sendo que 18 CPs aguardaram o período de 3 horas para iniciarem os procedimentos de cura térmica. Conforme demonstra a tabela 14, 06 Cps não receberam cura térmica, sendo os CPs de *Referência*. Na figura 20, podemos ver o fluxograma que descreve a seqüência de cura dos corpos-de-prova e o armazenamento até a data de rompimento.

Tabela 14 - Número de CPs para ciclo de cura – espera de 3 horas

Traços	Referência	Espera = 3 hora s			Total
		Temperatura Cura			
		23 °C	40 °C	60 °C	
1:9	06 cp	06 cp	06 cp	06 cp	24 cp

As Figuras 17, 18 e 19 (gráficos tempo x temperatura) mostram os ciclos de cura a vapor, com início do aquecimento após 1 hora, 2 horas ou 3 horas de espera. Mostram também a elevação da temperatura de 40° C/h, mantendo a temperatura máxima por 3 horas para a

temperatura de 80° C, 4 horas para 60° C e 5 horas para 40° C.

Os ciclos onde os CPs aguardaram 1 hora de espera, para iniciar o aquecimento, têm um tempo total de 7 horas e os ciclos onde os CPs aguardaram 2 ou 3 horas de espera, têm um tempo total de 8 ou 9 horas respectivamente.

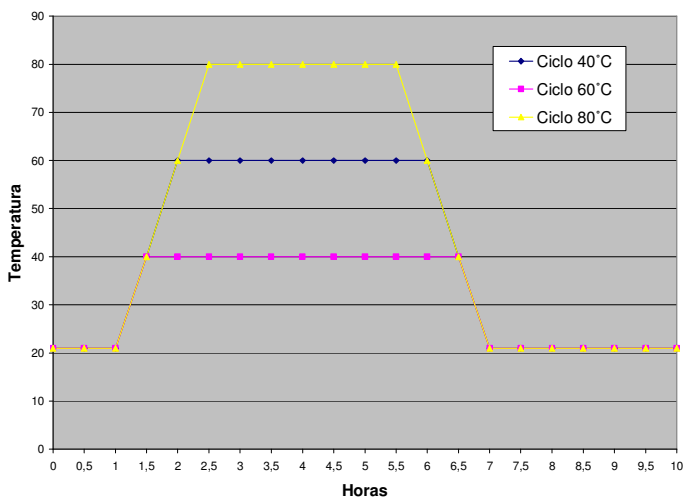


Figura 17 - Ciclos térmicos com 1 hora de espera

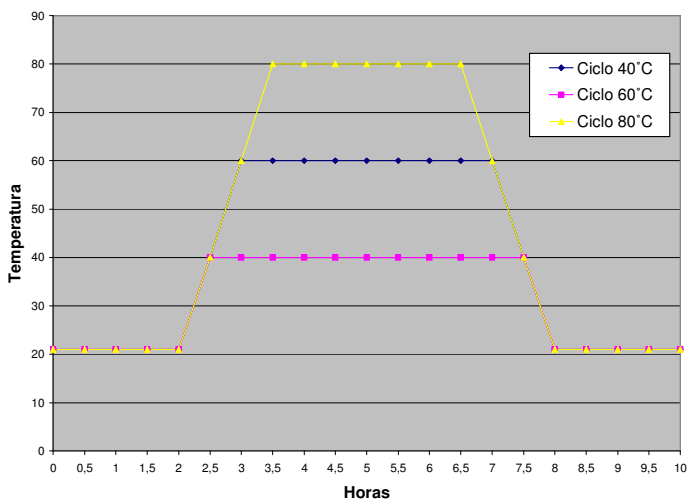


Figura 18 - Ciclos térmicos com 2 horas de espera

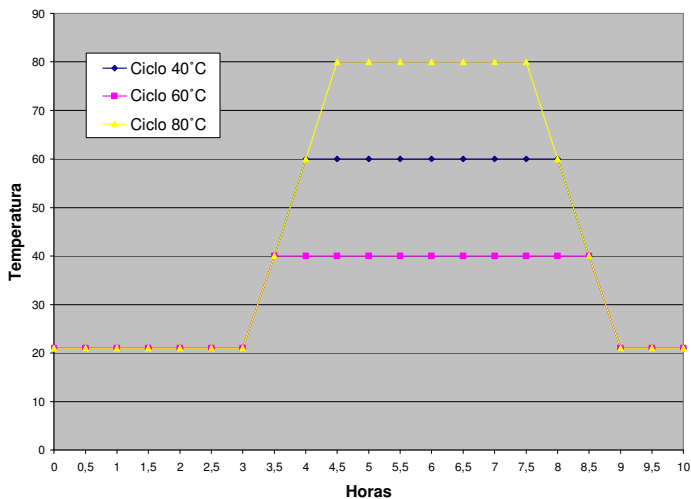


Figura 19 - Ciclo térmico com 3 horas de espera

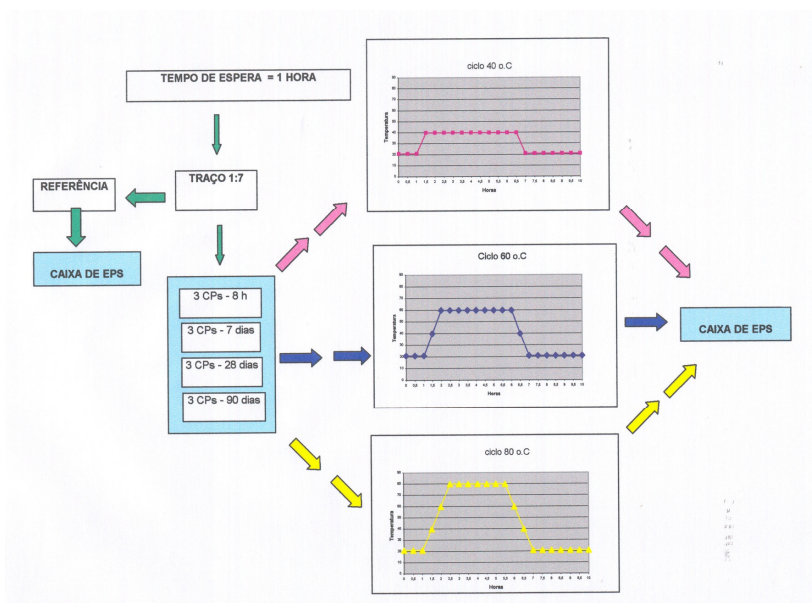


Figura 20 - Fluxograma sequência de cura dos corpos-de-prova

7.5 Procedimentos de cura

Para estudar a influência da cura térmica em peças pré-moldadas, foram simuladas as condições de uma câmara de cura a vapor através de um sistema tipo banho-maria. O sistema era composto por uma caixa metálica, com uma resistência instalada no fundo, controlada por um termostato digital e um sensor de temperatura. Este conjunto, com acionamento elétrico ativa a resistência, imersa em um lâmina de água de 6 cm, produzindo vapor até que o sistema entre em equilíbrio, atingindo uma dada temperatura ajustada no termostato. Os CPs foram colocados dentro da caixa sobre um berço com alças próprias para movimentação das peças. O berço tem o fundo em chapa metálica perfurada, em formato de moedas, permitindo a livre passagem do vapor da água produzido pela lâmina de água aquecida no fundo da caixa, ficando suspenso sem entrar em contato com a água (Figura 19).

Após o sistema atingir o equilíbrio, o termostato mantinha a temperatura do conjunto acionando e desligando a resistência, conforme a necessidade ou não de calor.

Para os ciclos térmicos em estudo, a temperatura foi sendo ajustada a cada 10 minutos, fazendo com que o sistema aquecesse a um gradiente de 40 C/h.

Foram planejados ciclos térmicos incluindo moldagem, tempo de espera, aquecimento, temperatura máxima e resfriamento para um período de 8 horas, tempo este adaptável a rotina das fábricas de pré-moldados e possibilitaria 3 turnos de trabalho diários, em caso de necessidade para atender a demanda.

O estudo do traço 1:9, com 3 horas de espera, apresenta um tempo total de 9 horas. Este estudo foi incluído, para demonstrar se o aumento do tempo de espera, em mais uma hora, apresentaria um ganho significativo de resistência, após o ciclo térmico.

O resfriamento foi conseguido pela troca da água da água aquecida por água em temperatura ambiente, sendo a água quente retirada pela torneira instalada na lateral da caixa e a água fria colocada por uma mangueira inserida em um furo na tampa. A tampa também é resfriada através de panos molhados em água gelada e gelo, terminando o resfriamento, quando o sistema de troca de água não é mais eficiente, abaixo dos 30° C.

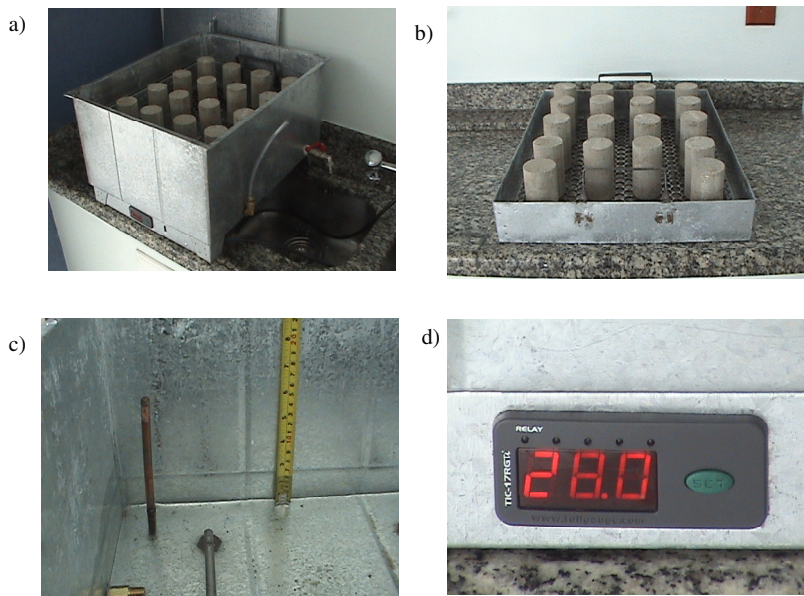


Figura 21 - Sistema para cura térmica a vapor

Caixa metálica

- a) Berço metálico para movimentação das peças;
- b) Fundo da caixa mostra sensor de temperatura, medida da lâmina de água, ao fundo parte da resistência de aquecimento e na lateral, parte interna do extravasor;
- c) Termostato.

Todo o ciclo foi feito sem a abertura da tampa, sem a fuga do vapor evitando assim choque térmico e ressecamento dos CPs. Na lateral da caixa, um extravasor com um Joelho ligado a uma mangueira transparente, possibilita acompanhar o nível da água retirada ou acrescida.

Há também um furo na tampa onde foi instalado um termômetro para acompanhar a temperatura do sistema, garantindo o gradiente de aquecimento e do resfriamento. As leituras no termômetro a cada 10 minutos indicam ao operador dos ensaios a necessidade de interferir no sistema de aquecimento ou no resfriamento, para conseguir o gradiente térmico preestabelecido.

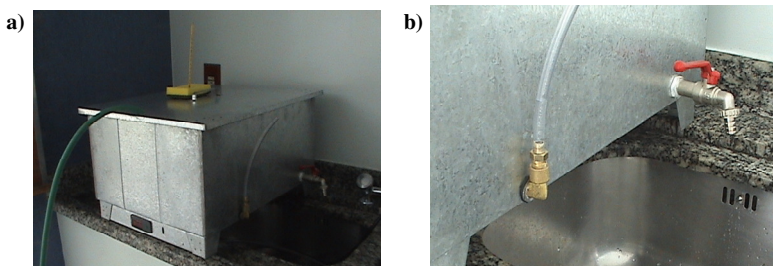


Figura 22 - Sistema de resfriamento

- a) Mangueira para acréscimo de água fria. Sobre a tampa, termômetro para acompanhar desenvolvimento das temperaturas;
- b) Extravasor para indicar nível da água dentro da caixa e torneira de saída da água quente.

Os corpos-de-prova, chamados de *Referência*, os quais *não receberam tratamento térmico*, foram mantidos desde o momento da moldagem dentro de uma caixa de EPS, com controle de temperatura e umidade.

Os CPs de *Referência*, e os lotes que receberam cura térmica, foram mantidos dentro desta caixa, sobre uma grade, sem contato com a água, até a data de rompimento.

A caixa de EPS possuía uma lâmina de água saturada de sal (Cloreto de Sódio), visando manter a umidade do ar em torno de 75% . Esta lâmina de água, em contato com um aquecedor com termostato, mantinha as condições de temperatura, dentro da caixa, em torno de 23° C.

Para analisar a influência da temperatura de cura no desenvolvimento da resistência os lotes de 12 CPs tiveram a seguinte seqüência de rompimentos:

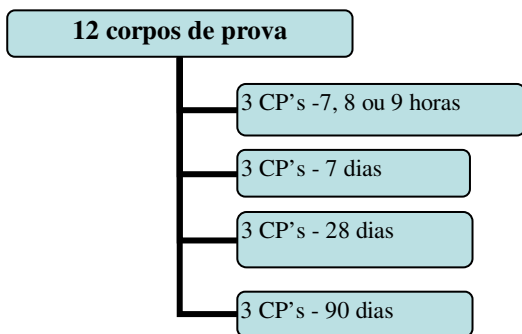


Figura 23 - Tempo de cura até ensaio de Resistência

A resistência à compressão dos CPs, foi obtida em ensaio em prensa da marca Shimadzu, escala de 40KN. Antes dos ensaios, os CPs foram capeados para regularizar a base dos mesmos, a fim de evitar a concentração de cargas em algum ponto, dispersando os resultados.

O capeamento dos CPs, rompidos 12 horas após a moldagem, foi feito com pasta de gesso e os demais com pasta de cimento.

8 RESULTADOS E ANÁLISE

A Tabela 15 apresenta os resultados de resistência à compressão para os ciclos de cura estudados, com 1 ou 2 horas de espera, que serão utilizados para análise dos resultados.

Tabela 15 - Resultados: Corpos de prova submetidos à cura térmica com tempo de espera de 1 ou 2 horas.

Tempo	Ref.	40°C 1h	40°C 2h	60°C 1h	60°C 2h	80°C 1h	80°C 2h
Traço 1:7							
8 horas	0	1,87	2,85	3,65	4,66	4,37	4,9
7 dias	10,69	7,89	9,27	9,7	9,98	9,44	9,7
28 dias	11,99	11,51	11,19	10,86	10,81	10,55	10,94
90 dias	12,42	11,87	11,64	12,26	11,61	11,84	10,33
Traço 1:9							
8 horas	0	1,14	1,92	2,76	3,48	2,82	3,82
7 dias	9,12	7,6	8,1	7,62	8,65	6,75	7,22
28 dias	10,27	9,47	10,1	10,23	9,56	8,86	9,43
90 dias	10,67	10,45	9,93	10,24	10,12	8,72	8,58
Traço 1:11							
8 horas	0	0,69	1,12	1,76	2,12	2,09	2,66
7 dias	7,18	6,31	6,83	6,39	6,93	5,76	5,88
28 dias	9,21	9,34	9,2	7,69	8,3	8,72	7,99
90 dias	9,05	9,71	9,98	9,29	8,66	9,41	8,66

Os resultados de resistência à compressão, obtidos após o ciclo de cura, alcançaram o objetivo inicial de alcançar elevadas resistências em curto prazo.

Pode-se observar nas Figuras 24, 25 e 26 que no período inicial, a cura térmica contribuiu para que em todos os traços e temperaturas estudadas, os CPs apresentassem resistência à compressão suficiente para movimentação e paletização das peças. Em idades mais avançadas, os valores da resistência das peças, foram geralmente mais baixos que os valores encontrados para os CPs de referência, como em estudos anteriormente apresentados na literatura.

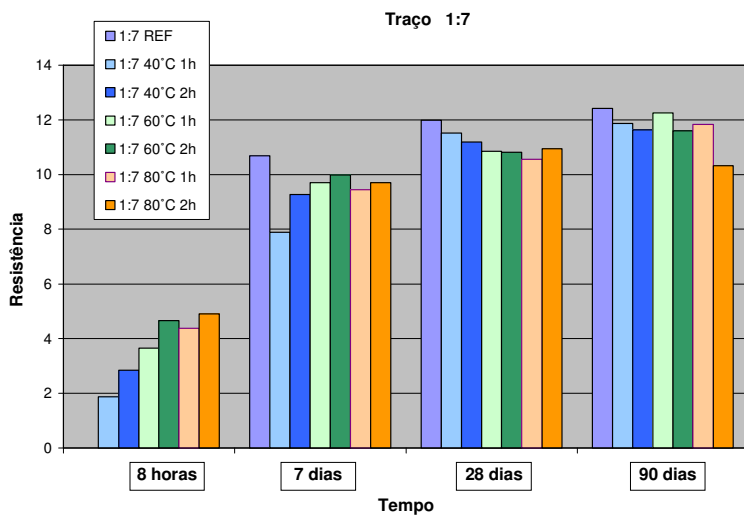


Figura 24 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:7.

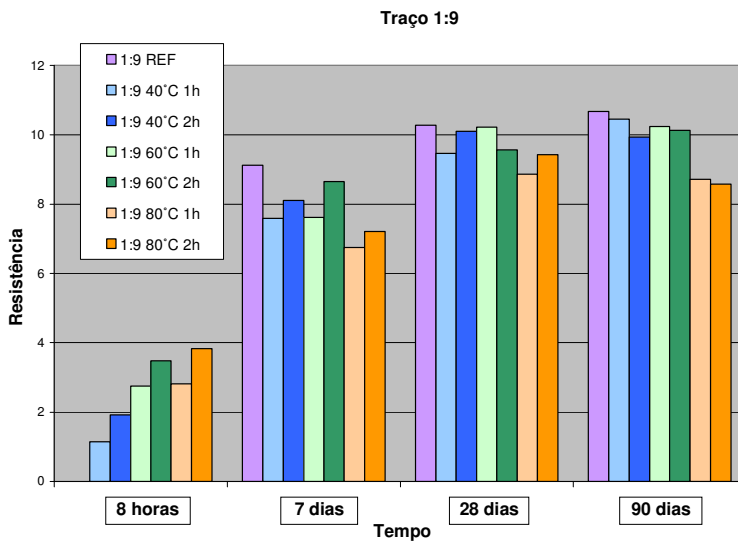


Figura 25 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:9.

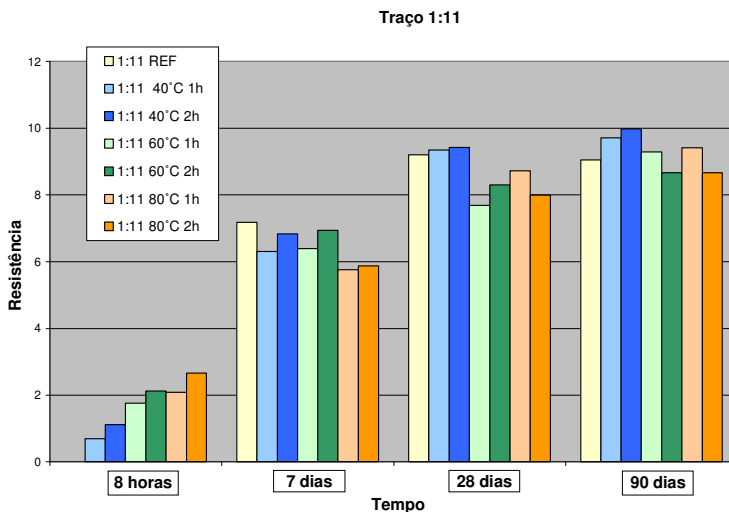


Figura 26 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:11.

A Tabela 16 e as Figuras 28, 29 e 30 mostram os percentuais de perda de resistência das peças curadas com vapor comparadas às peças de referência.

Na maioria dos traços e temperaturas estudadas, as peças curadas com vapor, tiveram as maiores perdas de resistência aos 7 dias do que em idades mais avançadas, quando comparadas com as peças de referência. As perdas de resistência aos 7 dias, para todos os traços e temperaturas estudadas, foram mais acentuadas para as peças curadas com 1 hora de espera do que as que iniciaram a cura após 2 horas de espera. Observou-se também que as perdas em longo prazo são maiores para as temperaturas mais altas de cura.

Uma comparação, entre os traços com diferentes teores de cimento, mostra que as peças com traço mais rico apresentaram as maiores resistências em idades iniciais e maiores perdas de resistência em longo prazo. Estes efeitos prejudiciais da cura térmica nestas misturas podem ser justificados pela maior ascensão da temperatura impulsionada pelo calor de hidratação do cimento, durante o período de elevação da temperatura, ocasionando maior expansão.

Em longo prazo observa-se que na maioria dos casos, aos 28 e 90 dias, as perdas são mais expressivas nos CPs curados com 2 horas de espera.

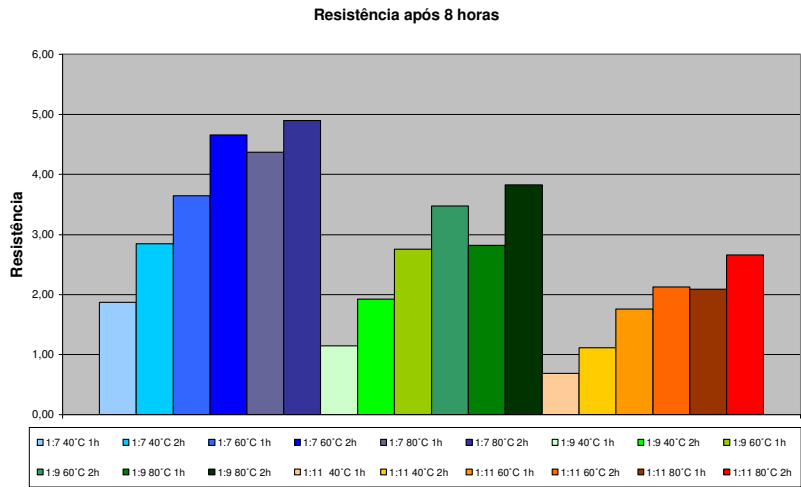


Figura 27 – Resultado dos ensaios após a cura térmica – 8 horas.

Tabela 16 – Comparativo: Valores Obtidos/Valores de Referência para cada idade, traço e temperatura de cura térmica, em percentual.

Cp's / REF							
Tempo		40°C 1h	40°C 2h	60°C 1h	60°C 2h	80°C 1h	80°C 2h
	REF	Perda em %					
Traço 1:7							
7 dias	10,69	-26,2	-13,3	-9,3	-6,6	-11,7	-9,3
28 dias	11,99	-4,0	-6,7	-9,4	-9,8	-12,0	-8,8
90 dias	12,42	-4,4	-6,3	-1,3	-6,5	-4,7	-16,8
Traço 1:9							
7 dias	9,12	-16,7	-11,2	-16,4	-5,2	-26,0	-20,8
28 dias	10,27	-7,8	-1,7	-0,4	-6,9	-13,7	-8,2
90 dias	10,67	-2,1	-6,9	-4,0	-5,2	-18,3	-19,6
Traço 1:11							
7 dias	7,18	-12,1	-4,9	-11,0	-3,5	-19,8	-18,1
28 dias	9,21	1,4	-0,1	-16,5	-9,9	-5,3	-13,2
90 dias	9,05	7,3	10,3	2,7	-4,3	4,0	-4,3

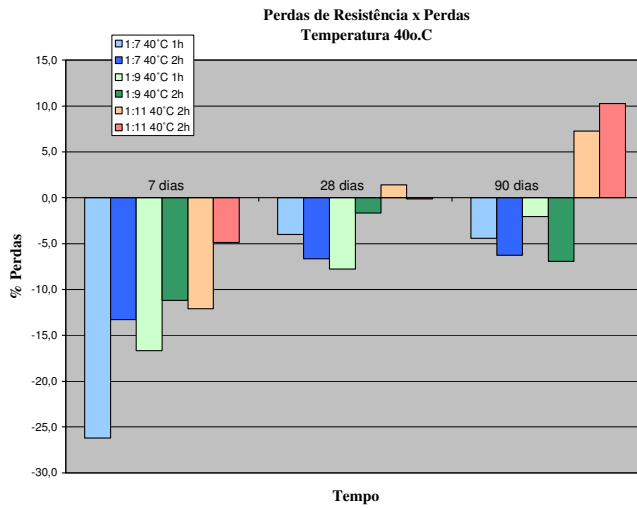


Figura 28 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas com vapor x peças de REF, em pontos percentuais, para temperatura de cura de 40°C.

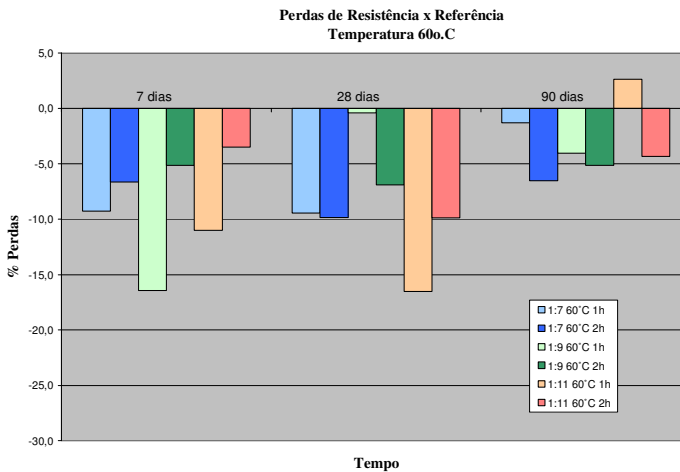


Figura 29 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas com vapor x peças de REF, em pontos percentuais, para temperatura de cura de 60°C.

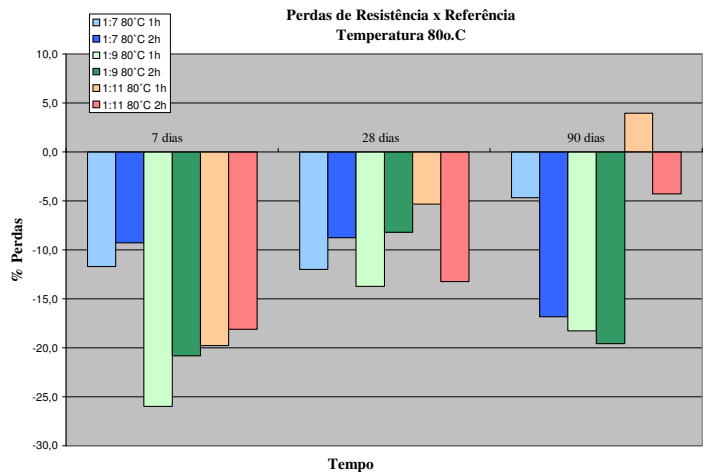


Figura 30 – Perdas de Resistência à compressão das peças curadas com vapor x peças de REF, em pontos percentuais, para temperatura de cura de 80°C.

Pode-se observar claramente nas Figuras 31, 32 e 33, um aumento da resistência, após o ciclo térmico, nas peças que iniciaram o aquecimento apo um período de 2 horas, comparado àquelas que iniciaram o ciclo térmico após uma hora da mistura.

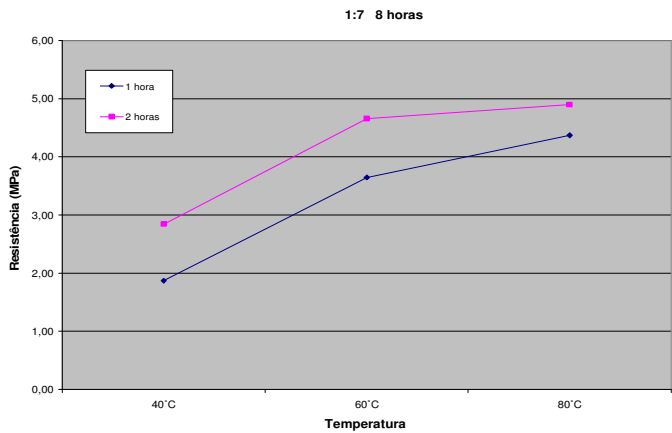


Figura 31 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:7 com 1 e 2 horas de espera.

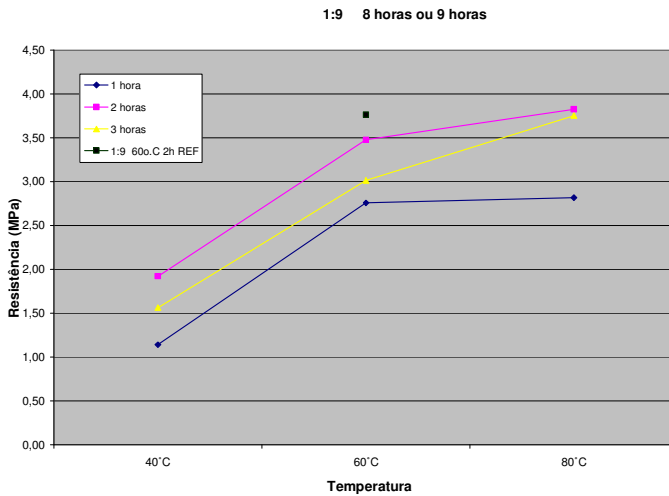


Figura 32 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:9 com 1, 2 e 3 horas de espera.

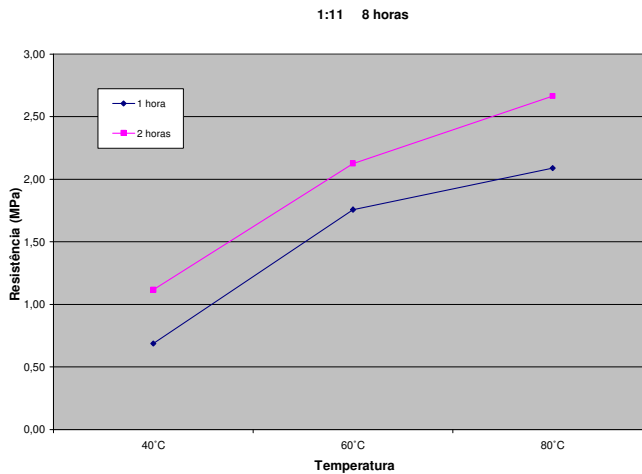


Figura 33 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:11 com 1 e 2 horas de espera.

Pode-se justificar, este aumento da resistência obtido com um maior tempo de espera antes do início do aquecimento pelo seguinte: ao

e elevar a temperatura de cura da câmara de vapor, a temperatura do concreto começa a subir, iniciando a transferência de calor de fora para dentro das peças. Se a aplicação de calor iniciar muito antes do início de pega do concreto, as partes externas endurecerão antes das partes internas das peças, onde o concreto ainda se encontra no estado plástico. Assim, um esqueleto rígido se forma em torno de um interior plástico. Enquanto a temperatura interna aumenta (devido à aplicação do vapor e do calor de hidratação), o concreto fresco interno tentará se expandir. Conseqüentemente, o escudo rígido exterior poderá ser danificado devido a diferenças de tensões induzidas por esta expansão. Além disso, durante o aquecimento, as diferenças no coeficiente de expansão térmica dos ingredientes do concreto podem induzir a micro fissuras e resultar em uma porosidade aumentada. Mas, se o aquecimento inicia logo após o início de pega do concreto, estes efeitos deletérios podem ser impedidos pela resistência às expansões.

Como já descrito anteriormente no capítulo 6, analisando, a nível microscópico, a formação da estrutura da pasta de cimento endurecida, com um período de espera a temperatura ambiente, favorece-se a formação de núcleos de cristalização do C-S-H em número e distribuição suficientes, pelos espaços entre os grãos de cimento, que orientarão a evolução uniforme da estrutura interna, garantindo o crescimento da resistência durante o aquecimento. Porém, se a hidratação for acelerada, resultará uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação, afetando a resistência mecânica da pasta como um todo. (KJELSEN et al., 1990; PATEL et al., 1995; PATEL et al., 1996; SCRIVENER, 1992; SCRIVENER E WIEKER, 1992).

Na Tabela 17 e Figura 34 podemos observar os percentuais de aumento da resistência à compressão, obtidos com o aumento do tempo de espera de 1 hora para 2 horas. Podemos observar que na temperatura de 40° C, aumentando o tempo de espera de uma para 2 horas, o valor da resistência à compressão aumentou, em todos os traços estudados, em mais de 50%.

Na Tabela 18 e Figura 35 são apresentados os resultados obtidos com um aumento do tempo de espera para 3 horas.

Tabela 17 - Resultados: Razão entre resultados com tempo de espera de 2h/1h para rompimentos após 7h ou 8h

Temperatura 40°C		Resistência Razão 2h/1h %	Temperatura 60° C		Resistência Razão 2h/1h %	Temperatura 80° C		Resistência Razão 2h/1h %
1:7 1h	1:7 2h		Razão 2h/1h %	1:7 2h		1:7 1h	1:7 2h	
1,87	2,85	52	3,65	4,66	28	4,37	4,9	12
1:9 1h	1:9 2h		1:9 1h	1:9 2h		1:9 1h	1:9 2h	
1,14	1,92	68	2,76	3,48	26	2,82	3,82	35
1:11 1h	1:11 h		1:11 1h	1:11 h		1:11 1h	1:11 h	
0,69	1,12	62	1,76	2,12	20	2,09	2,66	27

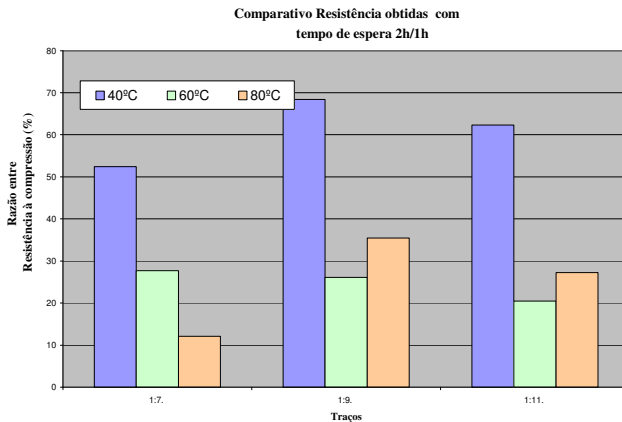


Figura 34 – Razão entre Resistências à compressão com 1 ou 2 horas de espera.

Tabela 18 - Resultados : Corpos de prova submetidos a cura térmica com tempo de espera de 2 e 3 horas. Razão entre resultados com tempo de espera de 3h/2h.

Traço 1:9				Resistência Razão 3h/2h %
Tempo			40° C 3h	
9 horas			1,56	
7 dias			7,11	
Tempo	REF	60° C 2h REF	60° C 3h	
9 horas		3,76	3,02	-20
7 dias	9,05	8,71	6,94	-20
Tempo			80° C 3h	
9 horas			3,75	
7 dias			8,33	

Esta série foi moldada para comprovar que, se aumentando o tempo de espera em mais uma hora, aproximando-se mais do tempo de início de pega do concreto, poderia-se obter resultados ainda melhores conforme sugerido na bibliografia consultada (ACKER, 1986; BUTT, 1968; REINSDORF, 1964).

A série de CPs para estudo do tempo de espera de 3 horas, foi moldada posteriormente, com outro lote de cimento com a mesma composição, visto que o anterior já estava com a data de validade vencida e poderia ter perda de eficiência, distorcendo os resultados.

Foram então moldados novamente os CPs de Referência, sem tratamento térmico no traço 1:9, e também CPs com tempo de espera de 2 horas curados à temperatura de cura de 60° C (1:9 60°C 2h REF), para um comparativo com os CPs moldados com tempo de espera de 3 horas para as diversas temperaturas de cura.

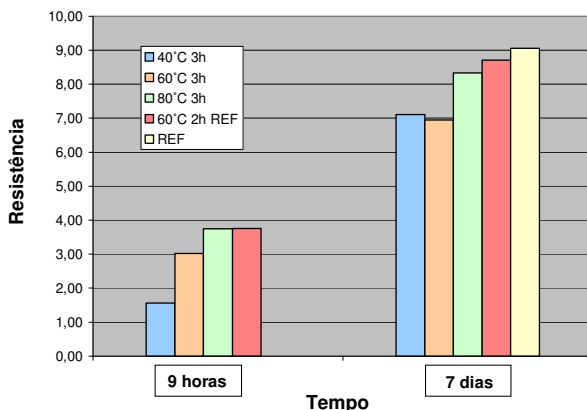


Figura 35 – Resultados dos corpos-de-prova do traço 1:9 com 2 ou 3 horas de espera.

Pode-se observar que, com o aumento do tempo de espera para 3 horas, obtiveram-se os resultados para a resistência à compressão, para todas as temperaturas, menores do que os conseguidos com a temperatura de 60° C e 2 horas de espera (Figuras 32 e 35). Aumentando o tempo de espera para 3 horas, encontrou-se uma resistência, para a temperatura de 60°C, 20% menor que a obtida com 2 horas de espera, para os ensaios com 8 horas e após os 7 dias da moldagem. (Tabela 18). A partir destes resultados, pode-se concluir que não há proveito em iniciar o aquecimento após longos períodos de espera, conforme já

anteriormente descrito por CAMARINI E CINCOTTO (1996). Entretanto, deve ser ressaltado que o tempo de pega do cimento utilizado era de 193 minutos (superior a 3 horas). Então, as afirmações feitas pela bibliografia de que o tempo ótimo de espera seria o de tempo de início de pega não se confirmou.

Também se pode observar maiores perdas de resistência das peças aos 7 dias, comparadas às peças de referência, sem tratamento térmico. Nas peças curadas a temperatura de 60°C, com 2 horas de espera, esta perda não é tão acentuada, como se pode verificar no gráfico da Figura 29.

Este estudo sugere que a temperatura de cura de 60°C e espera de 2 horas, quando utilizado o cimento ARI-RS com adição de cinza volante, é a mais indicada para uso na prática, em empresas produtoras de blocos pré-moldados de concreto, porque atinge maiores resistências após o ciclo térmico (8 horas), atingindo com o tempo de espera de 2 horas resistência maior que a obtida com temperaturas de 80°C e tempo de espera de 1 hora, e também superior a qualquer temperatura e tempo de espera de 3 horas.

De acordo com vários autores (CAMARINI, 1995; KUZEL, 1996; SCRIVENER & LEWIS, 1997; SIEDEL et al., 1993) na maioria das pastas de cimento Portland curadas em temperaturas mais elevadas (entre 60°C e 80°C), seguida de cura úmida, a etringita secundária (AFtS) decomposta durante o ciclo térmico pode voltar a formar-se numa idade mais avançada. A AFtS tem sido frequentemente considerada um produto indesejável no concreto, pois pode causar danos pela expansão e destruição da coesão da pasta.

Assim, utilizando temperaturas de 60°C evita-se as conseqüentes perdas de resistência das altas temperaturas conforme se pode observar neste trabalho, evitando a possibilidade de formação de etringita secundária, bem como economizando energia no aquecimento das câmaras de cura.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Deste estudo podemos concluir:

1) A cura térmica contribui para que os corpos-de-prova de concreto apresentem uma resistência à compressão suficiente para movimentação e utilização das peças, após o ciclo de cura térmica. Diminuem o tempo de cura e conseqüentemente a área de estocagem das peças; Possibilitam uma maior rotatividade das chapas.

2) Em idades mais avançadas, os valores da resistência das peças, foram inferiores aos valores encontrados para os cp's de referência. As maiores perdas, para todos os traços e temperaturas foram encontradas aos 7 dias. As perdas de resistência aos 7 dias, foram mais acentuadas para as peças curadas com 1 hora de espera do que as que iniciaram a cura após 2 horas de espera.

3) Os resultados apontam maiores perdas de resistência à compressão em longo prazo para a temperatura mais alta de cura.

4) Para traços com diferentes teores de cimento, as peças com traços mais ricos apresentaram as maiores resistências em idades iniciais e maiores perdas de resistência em longo prazo.

5) Comparando-se resultados obtidos com tempo de espera de 1 ou 2 horas, observou-se que, em todas as situações do estudo, quando a cura térmica iniciou duas horas após a moldagem, os resultados para a resistência à compressão das peças após o ciclo, foram maiores do que para as peças iniciadas após uma hora. Para a temperatura de 40° C, a diferença obtida com o tempo de espera de 2 horas foi maior do que 50%, comparada às peças com tempo de espera de 1 hora.

6) Aumentando-se o período de espera para 3 horas, tempo próximo ao de início de pega do cimento utilizado, observa-se perda de resistência à compressão nas peças ensaiadas, após o ciclo térmico, comparadas às peças curadas na mesma temperatura e mesmo traço com 2 horas de espera. Demonstra maior perda aos 7 dias, na mesma comparação, concluindo não haver nenhum proveito em aumentar o tempo de espera.

7) Este estudo sugere que, para o cimento empregado nesta pesquisa (ARI-RS com adição de cinza volante que é o aglomerante mais empregado nas fábricas de bloco da região Sul do Brasil) a temperatura de cura de 60°C e espera de 2 horas, é a mais indicada para uso na prática, em empresas produtoras de blocos pré-moldados de concreto, porque atinge maiores resistências após o ciclo térmico (8 horas), atingindo com o tempo de espera de 2 horas resistência maior que a obtida com temperaturas de 80° C e tempo de espera de 1 hora, e também superior a qualquer temperatura e tempo de espera de 3 horas.

8) Nesta dissertação, os CP's cilíndricos 5x10 cm, foram moldados de forma manual, exigindo do operador certa sensibilidade na força aplicada na compactação final das peças. Esta energia se fosse aplicada com instrumento mecânico poderia minimizar diferenças de compacidade no material, padronizando a compactação das camadas, resultando em valores mais precisos.

9) Cabe ressaltar, que os dados apresentados neste estudo estão bem coerentes e confirmam a importância de estabelecer o tempo de espera e a temperatura a ser aplicada, quando se utiliza cura térmica. Também demonstram que, se a temperatura de cura não for muito elevada (superior a 60°C), as perdas de resistência observadas para idades elevadas (28 e 90 dias) podem ser facilmente compensadas com a correção do traço empregado.

Para ampliar os conhecimentos na produção de concretos submetidos à cura térmica, sugere-se estudos posteriores analisando:

- Influência da presença de aditivos de outras bases químicas;
- Outras propriedades do concreto endurecido tais como módulo de elasticidade, durabilidade frente a meios agressivos (cloretos, sulfatos, dióxidos de carbono, águas residuais industriais);
- Outros tipos de cimento;
- Presença de adições tais como escória de alto-forno, metacaulim, etc
- Porosidade e absorção da água.

10 REFERÊNCIAS

ABNT/NBR 7211 Agregado para concreto - Especificação

ABNT/NBR 6136 Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos

ABNT/NBR 5733 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial , 1991

ABNT/NBR 11768 Aditivos para concreto de Cimento Portland,1992

ABNT/NBR 9781 Peças de concreto para Pavimentação, 1987

ABNT/NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova.** Rio de Janeiro, 2003.

ABNT/ NBR 5739 - **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

ABRAMS, D. A., **Effect of time of mixing on the strength of concrete**, The Canadian Engineer.1918 (*apud NEVILLE A. M. Propriedades do Concreto. Trad. Salvador Giamusso*)São Paulo, PINI, 1982.)

AÏTCIN, P. C. .**Concreto de Alto Desempenho.** Tradução de Geraldo G. Serra. PINI,2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Accelerated curing at atmospheric pressure. Manual of Concrete Practice, p.517.2r-21-26, 1985.

ASAGA, K et al. **Effect of curing temperature on the hydration of Portland cement compounds.** In. ICCC, v4, p181, Delhi, India, 1992;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1985). **NBR-9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré - Moldado.** Rio de Janeiro. ABNT.

BASÍLIO, F.A.**Cura acelerada por agentes químicos.** In: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto: Colóquio sobre pré-moldados de

concreto,, São Paulo, fev.1976.

BATTAGIN,A.F. **Aplicación de técnicas físico-químicas em la caracterización mineralógica de las escórias de altos hornos de las principais siderúrgicas del Brasil.** Cemento Hormigón, n.568, pp.209-47, marzo 1981.

BATTAGIN,A.F. **Influence of degree of hydration of slag on slag cements.** In: ICCI, 9TH, pp. 166-72, New Delhi, nov, 1992.

BATTAGIN,A.F. **Influência das condições de cura no grau de hidratação da escória e na resistência à compressão do cimento Portland de alto-forno.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA DO CIMENTO, 3°. 1993.

BAUER, L.A.F.; OLIVAN,L.I. **Ensaio acelerados para previsão da resistência do concreto.** Construção Pesada, jan 1977.

BIRINDELLI, L.I.O. **Resistência à compressão do concreto de cimento Portland de alto-forno. Ensaio acelerado – método da água em ebulição.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1985.

BRADY,J.E.; HOLUM,J.R. **Chemistry: the study of matter and its changes.** John Wiley & Sons, Inc., 1993, 1109 p.

BUTT,M. **High-temperature curing of concrete under atmospheric pressure.** In: International Congress on the Chemistry of Cement, 5th, v.3, Tokyo,1968.

CALLISTER, W. D. - **Materials science and engineering: an introduction.** 3°. edição, , USA, 1994.

CARINO, N. J., **The Maturity Method.** In: **CRC Handbook on nondestructive testing of concrete.** V. M. Malhotra and N. J. Carino. Eds. CRC Press: 1991. p. 101-146.

CAO, Y. & DETWILER, R. J. **Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures.** Cement and Concrete Research, Vol. 25, No 3, pp. 627-638, 1995;

CAMARINI, G. **Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado** – Escola Politécnica USP - Departamento de Construção Civil, 252p. São Paulo, 1995;

CAMARINI, G. ; PETRONI, L. **Características e propriedades da cinza volante como material pozolânico e seu comportamento na cura acelerada.** Dissertação de Mestrado – EESC-USP – São Carlos, 1988.

CAMARINI, G. ; CINCOTTO, M. A.. **Influência das condições iniciais da cura térmica na resistência do concreto.** Anais da 38ª REIBRAC - Reunião Anual do IBRACON, 1996. Ribeirão Preto, SP , volume 2.

CAMARINI, G. ; CINCOTTO, M. A.; PETRONI, L. **Aplicação da cura térmica em cimentos com adições de cinza volante. In: 37ª.** REIBRAC - Reunião Anual do IBRACON, Goiânia, GO, julho, 1995

CAMPBELL, G. M.& DETWILER, R. J. **Development of mix designs for strength and durability of steam-cured concrete.** Concrete International: Design and Construction, vol. 15, Nº 7., pp. 37-39, Jul 1993;

CIMENTO ITAMBÉ www.cimentoitambe.com.br DE MÉLO, A. B., **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland.** 2000. 256p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação Área Interunidades - Ciência e Engenharia de Materiais - da Universidade de São Paulo, São Carlos.

DIAMOND, S. **The microstructure of cement in concrete.** In: ICCI, 8º, v1, Rio de Janeiro, 1986;

DIAS, F. et al. **Técnicas e tecnologia do concreto curado à vapor.** In: IN: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Reunião 1983. Seminário sobre Produção do Concreto, São Paulo, jun-jul. 1983.

FERREIRA JUNIOR, S.; **Peças de concreto para pavimentação.** 25ª. Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo, Outubro, 1991, p.837-849.

FRASSON, J.A. **Metodologia de dosagem e processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Florianópolis, 2000.
Dissertação de Mestrado – Curso de pós-graduação em Engenharia Civil - UFSC

GARTNER, E. M.; GAIDIS, J. M. **Hydration mechanisms**. In: Materials Science of Concrete I. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, 1989;

HOLANDA, F.G.; VASCONCELOS, G.R.L. **Cura térmica de elementos estruturais pré-moldados na construção da hidrelétrica de Tucuruí**. In: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, Reunião de 1981; Seminário sobre Inspeção do Concreto, São Paulo, jul. 1981.

JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J.F. **Hydration of portland cement. in: structure and performance of cements**. Ed. Barbes, P. Applied Science Publishers, London, 1983

JUVAS, K.. **Very dry precasting concrete**. In: Special Concretes: Workability and Mixing – Proceedings of international RILEM Workshop, London, 1993. p.153-168.

KIESLING, E. **Curing Concrete**. Betonwerk und Fertigteil – Technik, n.7, p.80-6, july, 1992.

KJELLESSEN, K. O., DETWILER, R. J. **Reaction Kinetics of portland cement and mortars hydrated at different temperatures**. Cement and Concrete Research, v22, n1, p 112 , jan, 1992;

KJELLESSEN, K. O., JENNINGS, H. M. & LAGERBLAD, B. **Evidence of hollow shells in the microstructure of cement paste**. In Cement Concrete Research, V. 26, No 4, pp. 593-599, 1996;

KJELLESSEN, K. O.; DETWILER, R. J & GJORV, O. E. **Pore structure of plain cement pastes hydrated at different temperatures**. Cement and Concrete Research, vol. 20 N° 6, p 927-933, Nov. 1990;

KUZEL, H. J. **Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cement**. Cement and Concrete Composites, 18, pp. 195-203, 1996;

- LIBÓRIO, J. B. L. **Contribuição ao Estudo Patológico de Construções de Argamassa Armada Existentes no Brasil.** São Carlos: EESC-USP, 1990. Tese de Doutorado.
- MALHOTRA, V.M. **O passado, o presente e o futuro dos ensaios acelerados de concreto.** In: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Nov,1976.
- MALHOTRA, V. M. - **Developments in the use of superplasticizers.** American Concrete Institute, SP-68, Detroit, Michigan, 1981;
- MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. **The microestructure of dry concrete products.** Cement and Concrete Research, vol.26, No.3, p.427-438, 1996.
- MEDEIROS, J.S.; **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto.** São Paulo, 1993. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. - **Concreto: estruturas, propriedades e materiais,** São Paulo: Pini, p. 573, 1994;
- MILMAN, B. **Pré-fabricação de edifícios.** 1.ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1971. 308p.
- NEVILLE A. M. **Propriedades do Concreto.** Trad. Salvador Giamusso, São Paulo, PINI, 1982.
- NUGENT, F.R. **Ensaio acelerados no controle da qualidade do concreto.** In: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Colóquio sobre pré-moldados de concreto, São Paulo, fev. 1976.
- OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** Florianópolis, 2004. Tese de doutorado - Curso de pós-graduação em Engenharia Civil – UFSC
- ORDONÉZ, J. A. F. **Pre -fabricacion – teoría y práctica.** v.1. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1974.
- PATEL, H. H., BLAND, C. H. & POOLE, A. B. **The microstructure**

of concrete cured at elevated temperatures. Cement and Concrete Research, vol. 25 Nº 3, pp. 485-490, 1995;

PATEL, H. H., BLAND, C. H. & POOLE, A. B. **The microstructure of steamcured pre-cast concrete.** Advances in Cement Research, 8, No 29, pp. 11-19, jan, 1996;

PFIEL, W. **Ponte Presidente Costa e Silva – Rio-Niterói: Métodos Construtivos.** LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 1975.

PINTO, R. C. A... **Determinação da Energia Aparente de Ativação da Hidratação do Cimento.** e-mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol 1, nº2, pp. 95-104, 2004.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C.A. **CT-9 e CT-10 – Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural.** Revista Prisma – soluções construtivas em pré-fabricados de concreto – Caderno Técnico Alvenaria Estrutural - <http://www.revistaprisma.com.br>.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN, C.A. **Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto,** Florianópolis, 2002.

PRUDÊNCIO JR, L. R., **Tecnologia do Concreto de Cimento Portland** – Apostila curso mestrado em Engenharia Civil – Florianópolis, set. 1999.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de Ensaio Não Destrutivos para Pavimentos Fast Track,** Qualificação de Dissertação de Mestrado junto ao programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina. Março, 2006

RODRIGUES, P.P.F. **Estágio atual da pavimentação intertravada no Brasil.** In: 4º. Seminário sobre normalização de cimento, concreto e agregados. IBRACON, São Paulo, 1986.

RODRIGUES, P.P.F. **Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.** In: Reunião anual, São Paulo:IBRACON, 27 a 31 agosto,1984.

RODRIGUES, P.P.F. **Fabricação de blocos pré-moldados de concreto**

- para pavimentação – Prática Recomendada.** 2ª. edição. São Paulo: ABCP, 1995-a, 15p.
- ROMERO, A.M.; BRAGA, J.A. **Informações relativas à cura à vapor.** In: IN: IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Reunião 1983. Seminário sobre Produção do Concreto, São Paulo, jun-jul. 1983.
- SAUL, A. G. A. **Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure.** Magazine of Concrete Research, London, v. 2, n. 6, pp. 127 – 140, 1951.
- SCOARIS, M.R.; BARBOSA, M.P.; PINTO JÚNIOR, N.O., **Avaliação da resistência e rigidez de concretos reforçados com fibras submetidas a cura térmica pelo método da maturidade.** Revista e-Mat, Vol. 2, n. 2, p. 127-141, Novembro 2005
- SCRIVENER, K. L. **The microstructure of concrete.** In Materials Science of Concrete, p. 127-161, 1988;
- SCRIVENER, K. L.; WIEKER, W. Advances in hydration at low, ambient and elevated temperatures. In: ICCI, 9th, v.1, New Delhi, India, 1992.
- SCRIVENER, K. & LEWIS, M. **A microstructure and microanalytical study of heat cured mortars and delayed ettringite formation.** Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 4 Performance and Durability of Cementitious Materials, Gothenburg, Sweden, June 2-6, 1997;
- SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B.N. **A Industrialização e os Pré-fabricados em Concreto Armado.** Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ), Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. In: IV SIBRAGEC – Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, Porto Alegre, 2005.
- SIEDEL, H. et al. **Secondary ettringite formation in heat treated Portland cement concrete: influence of different w/c ratios and heat treatment temperatures.** Cement and Concrete Research, v2, n4, p 453, 1993;

TANGO, C. E. S. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais** - IPT-São Paulo. Proceedings – 5th Internacional Seminar on Structural Masonry for Developing Countries – Florianópolis ,SC, Brazil ,1994

TARTUCE, R.; GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre o concreto de cimento Portland**. São Paulo, PINI, 1990.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academic Press Ltd, London, 1992;

VASCONCELOS, A. C. **O Concreto no Brasil - pré-fabricação, monumentos, fundações**. Volume III. São Paulo: Studio Nobel, 2002.

ZANFELICE, J.C. **Investigação sobre os métodos de ensaio acelerado da resistência do concreto**. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, out. 1981.